



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

“DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS EN EQUIPOS INDUSTRIALES MEDIANTE ANÁLISIS VIBRACIONAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE LabVIEW”.

**YANCHALIQÚIN PUNINA CARLOS RODRIGO
SALTOS GUERRERO MAURICIO ENOC**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

RIOBAMBA – ECUADOR

2013

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2012-10-09

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

CARLOS RODRIGO YANCHALIQÚN PUNINA

Titulada:

**“DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS EN EQUIPOS INDUSTRIALES
MEDIANTE ANÁLISIS VIBRACIONAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE
LabVIEW”.**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Geovanny Novillo A.

DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Pablo Montalvo

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Manuel Morocho

ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2012-10-09

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

MAURICIO ENOC SALTOS GUERRERO

Titulada:

**“DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS EN EQUIPOS INDUSTRIALES
MEDIANTE ANÁLISIS VIBRACIONAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE
LabVIEW”.**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Geovanny Novillo A.

DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Pablo Montalvo

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Manuel Morocho

ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: CARLOS RODRIGO YANCHALIQÚN
PUNINA

TÍTULO DE LA TESIS: “DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS EN EQUIPOS INDUSTRIALES MEDIANTE ANÁLISIS VIBRACIONAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE LabVIEW”.

Fecha de Examinación: 2013-12-09

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Fernando González (PRESIDENTE TRIB. DEFENSA)			
Ing. Pablo Montalvo (DIRECTOR DE TESIS)			
Ing. Manuel Morocho (ASESOR)			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES:

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Fernando González
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: MAURICIO ENOC SALTOS GUERRERO

TÍTULO DE LA TESIS: “DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS EN EQUIPOS INDUSTRIALES MEDIANTE ANÁLISIS VIBRACIONAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE LabVIEW”.

Fecha de Examinación: 2013-10-09

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Fernando González (PRESIDENTE TRIB. DEFENSA)			
Ing. Pablo Montalvo (DIRECTOR DE TESIS)			
Ing. Manuel Morocho (ASESOR)			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Fernando González
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que se presenta, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Carlos Rodrigo Yanchaliquín Punina

Mauricio Enoc Saltos Guerrero

DEDICATORIA

Me siento complacido de poder dedicar este trabajo primeramente a las memorias, de mi señor padre Don Basilio Yanchaliquín y de mi hermana Nancy Yanchaliquín, quienes mientras estuvieron físicamente junto a mí fueron pilar fundamental y ejemplo de perseverancia, humildad y rectitud, y desde que emprendieron su partida se convirtieron en ángeles que iluminan mi camino. Quiero dedicar también a toda la gente a quienes tengo la bendición de contar aún con su presencia física como lo son: mi querida mamacita Lolita Punina quien me ha brindado su apoyo incondicional y me ha sabido guiar por el camino del bien durante todo el tiempo que me ha representado el avanzar un peldaño más en mi vida, a mis hermanas, hermanos, mi novia y amigos quienes de una u otra forma han contribuido con su granito de arena para que sea posible este logro.

Carlos Rodrigo Yanchaliquín Punina

Este trabajo de grado va dedicado a mi madre quien desde el cielo guió y bendijo mis pasos en todo momento durante este proceso, fue ella el motivo principal de continuar con mis estudios superiores y culminarlos con éxito, a mí padre que fue un apoyo inquebrantable, quien me dio los ánimos suficientes para continuar con este proyecto cuando las circunstancias eran desfavorables y de manera especial a mi hermana Magaly Saltos que fue la persona que estuvo presente durante todo el proceso de estudios superiores y en la realización de este trabajo, sacrificando gran parte de su vida con el propósito de que terminara mi carrera de Ingeniería de Mantenimiento.

Mauricio Enoc Saltos Guerrero

AGRADECIMIENTO

Me es muy grato mediante este trabajo de grado poder hacer extensivo mi más sincero e imperecedero agradecimiento a Dios por permitirme la existencia a través de mis padres, a toda mi familia, a mis amigos, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, escuela de Ingeniería de Mantenimiento y en ella a mis distinguidos maestros incluyendo a mi director y asesor de tesis quienes con sus conocimiento, profesionalismo y ética puestos de manifiesto en las aulas me enrumbaron para poder cristalizar este anhelo.

Carlos Rodrigo Yanchaliquín Punina

Agradecer a Dios por brindarnos salud a mí y todas las personas que formamos parte de este trabajo, a mis padres quienes desde muy temprana edad incentivaron en mí las ganas de superación, a mis hermanos que con sus consejos, ánimos y recomendaciones lograron que continuara con los estudios después de varias circunstancias desfavorables encontradas durante el transcurso de la carrera, fueron ellos el pilar fundamental para empezar y terminar mis estudios.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, la Facultad de Mecánica, la Escuela de Mantenimiento por abrirme las puertas para realizar mis estudios universitarios, a los maestros que en su momento aportaron con sus conocimientos para crecer en intelecto, de manera especial a los ingenieros Pablo Montalvo y Manuel Morocho en calidad de Director y Asesor de mi tesis respectivamente y a una persona especial que estuvo presente durante la etapa final de la carrera brindándome todo su apoyo.

Mauricio Enoc Saltos Guerrero

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 <i>Objetivo general..</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Equipos industriales.....	4
2.1.1 <i>Concepto de equipo o máquina industrial</i>	4
2.1.2 <i>Principales equipos industriales.</i>	4
2.1.3 <i>Sistemas de transmisión de potencia.</i>	4
2.1.3.1 <i>Transmisión mediante ejes con acople.</i>	5
2.1.3.2 <i>Transmisión por poleas con correa.</i>	5
2.1.3.3 <i>Transmisión por engranajes.</i>	5
2.2 El análisis vibracional y la fuente de vibraciones (problemas) en equipos industriales.	6
2.2.1 <i>Vibración.</i>	6
2.2.1.1 <i>Elementos de una vibración.</i>	7
2.2.1.2 <i>Tipos de vibración.</i>	8
2.2.2 <i>Sistema vibratorio.</i>	8
2.2.3 <i>Naturaleza de la vibración.</i>	9
2.3 Ecuaciones de movimiento (unidades de vibración).	10
2.4 La transformada rápida de Fourier (FFT).	12
2.5 Fuentes de vibraciones (patologías) en equipos industriales y el análisis vibracional.	13
2.5.1 <i>Desbalanceo.</i>	13
2.5.2 <i>Desalineación.</i>	14
2.5.3 <i>Holgura mecánica.</i>	15
2.5.4 <i>Rozamiento.</i>	16
2.5.5 <i>Problemas en sistemas de transmisión por correa y poleas.</i>	16
2.5.6 <i>Problemas en sistemas de transmisión por engranajes.</i>	18
2.5.7 <i>Problemas en rodamientos.</i>	20
2.5.8 <i>Problemas en asientos hidrodinámicos o chumaceras.</i>	22
2.5.9 <i>Problemas en motores eléctricos asíncronos.</i>	23
2.5.10 <i>Problemas en turbomáquinas.</i>	24
2.6 <i>Normas Internacionales determinadas para el análisis vibracional.</i>	26
2.6.1 <i>Criterios, clases y zonas de evaluación.</i>	27
2.6.2 <i>Normas para medición en partes no rotatorias de la máquina.</i>	28
2.6.2.1 <i>ISO 2372-1974 “Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s.”.</i>	29
2.6.2.2 <i>ISO 10816 “Vibración mecánica – Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas”.</i>	29
2.6.2.3 <i>ISO 10816-3 “Vibración mecánica – Evaluación de la vibración de máquinas en base a su medición en Partes No-Rotatorias.</i>	30
2.6.3 <i>Normas para medición en partes rotatorias de la máquina.</i>	33
2.6.3.1 <i>ISO 7919 “Vibración mecánica de máquinas no alternativas –Medidas en ejes rotativos y evaluación”.</i>	34

2.6.3.2	<i>ISO 10817-1. “Sistemas de medida de vibración en ejes rotativos.....</i>	36
2.7	<i>Software LabVIEW.....</i>	36
2.7.1	<i>Entorno de LabVIEW.....</i>	36
2.7.1.1	<i>Diseño de la interfaz de usuario a partir de su código.....</i>	37
2.7.2	<i>Herramientas adicionales de LabVIEW.....</i>	40
2.7.2.1	<i>NI LabVIEW SignalExpress.....</i>	40
2.7.2.2	<i>NI Sound and Vibration Assistant.. ..</i>	41
2.7.2.3	<i>NI Sound and Vibration Toolkit.....</i>	42
2.7.3	<i>Aplicaciones de LabVIEW.....</i>	42
2.7.4	<i>Métodos de ventaneo.....</i>	42
2.7.4.1	<i>Ventana hanning.....</i>	44
2.7.4.2	<i>Ventana flat top.....</i>	44
3.	DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS	
3.1	<i>Etapas de recolección de datos.....</i>	46
3.1.1	<i>Etapas transductoras.....</i>	46
3.1.1.1	<i>Sensores de desplazamiento.....</i>	46
3.1.1.2	<i>Sensores de velocidad.....</i>	48
3.1.1.3	<i>Sensores de aceleración.....</i>	49
3.1.2	<i>Montaje del acelerómetro piezoeléctrico.. ..</i>	51
3.1.2.1	<i>Ubicación.....</i>	51
3.1.2.2	<i>Orientación.....</i>	52
3.1.2.3	<i>Fijación.....</i>	51
3.1.3	<i>Etapas de acondicionamiento.....</i>	53
3.1.3.1	<i>Amplificación.....</i>	53
3.1.3.2	<i>Aislamiento.....</i>	53
3.1.3.3	<i>Filtrado.....</i>	53
3.1.3.4	<i>Transformación.....</i>	53
3.1.3.5	<i>Excitación.....</i>	54
3.1.3.6	<i>Linealización.....</i>	53
3.1.3.7	<i>Multiplexación.....</i>	53
3.1.4	<i>Etapas de adquisición de datos.....</i>	54
3.1.4.1	<i>Los microcontroladores (PIC’s).....</i>	55
3.1.4.2	<i>Las tarjetas de adquisición de datos (DAQ’s).....</i>	55
3.2	<i>Etapas de análisis y presentación del diagnóstico.....</i>	56
3.3	<i>Criterios de selección y requerimientos del sistema.....</i>	57
3.3.1	<i>Criterios de selección.....</i>	57
3.3.1.1	<i>Criterios de selección de transductores.....</i>	57
3.3.1.2	<i>Criterios de selección de tarjetas.....</i>	58
3.3.2	<i>Requerimientos del sistema.....</i>	59
3.4	<i>Componentes del sistema.....</i>	60
3.4.1	<i>Platinum low-cost industrial icp® accelerometer, modelo número 603C01.....</i>	61
3.4.2	<i>Tarjeta de adquisición de datos cDAQ NI 9234.....</i>	61
3.4.3	<i>Chasis NI_cDAQ-9171.....</i>	62
3.4.4	<i>Accesorios de conexión y/o comunicación:.....</i>	63
4.	DISEÑO DE CIRCUITOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS MEDIANTE ANÁLISIS VIBRACIONAL.	
4.1	<i>Diseño de pantallas de navegación.....</i>	65
4.1.1	<i>Pantalla principal.....</i>	65
4.1.1.1	<i>While loop.....</i>	66
4.1.1.2	<i>Build array.....</i>	66
4.1.1.3	<i>Boolean array to number function.....</i>	66

4.1.1.4	<i>Case structure</i>	67
4.1.2	<i>Pantalla de adquisición, presentación y reporte de datos</i>	67
4.2	Diseño de circuitos de adquisición de datos.	68
4.2.1	<i>Convert from dynamic data</i>	68
4.2.2	<i>Index array</i>	68
4.2.3	<i>Amplitude and levels</i>	68
4.2.4	<i>Vibration level</i>	69
4.3	Diseño de circuitos de medición y presentación de los datos adquiridos ...	70
4.3.1	<i>Power spectrum</i>	71
4.3.2	<i>Peak search</i>	72
4.3.3	<i>Sort 1D array</i>	74
4.3.4	<i>Reverse 1D array</i>	75
4.3.5	<i>Array subset</i>	75
4.3.6	<i>DAQ assistant</i>	76
4.3.7	<i>Split signals</i>	77
4.4	Diseño de circuito de presentación y análisis del problema.	77
4.4.1	<i>Flat sequence structure</i>	78
4.4.2	<i>Convert to dynamic data</i>	79
4.4.3	<i>Merge signals</i>	79
4.4.4	<i>Build table</i>	79
4.5	Diseño del circuito para la generación de reportes	79
4.5.1	<i>New report VI</i>	80
4.5.2	<i>Word easy title VI</i>	80
4.5.3	<i>Append control image to report VI</i>	80
4.5.4	<i>Word easy text VI</i>	81
4.5.5	<i>Append table to report VI</i>	81
4.5.6	<i>Dispose report VI</i>	81
4.6	Diseño de del circuito para abrir el archivo de reportes	82
4.6.1	<i>File dialog</i>	83
4.6.2	<i>File/directory info</i>	83
4.6.3	<i>Strip path</i>	83
4.6.4	<i>Path to string</i>	83
4.6.5	<i>Concatenate strings</i>	83
4.6.6	<i>Sistem exec VI</i>	84
4.6.7	<i>Simple error handler VI</i>	84
5.	INSTALACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	
5.1	Instalación y acople de las diferentes herramientas que componen el sistema.	85
5.2	Pruebas preoperacionales y finales	86
5.3	Determinación de problemas característicos en equipos industriales.....	86
5.3.1	<i>Identificación de equipos</i>	87
5.3.2	<i>Obtención de datos</i>	91
5.3.3	<i>Interpretación, conclusiones y recomendaciones</i>	93
5.3.4	<i>Hojas de reportes</i>	94
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones.....	102
6.2	Recomendaciones	102

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Normativas del análisis vibracional.....	27
2 Rangos de evaluación de severidad vibratoria para máquinas normales (ISO 2372)	29
3 Rangos de velocidad vibratoria para diferentes clases de máquinas con velocidad de rotación sobre 600 cpm. ISO 10816-3.....	32
4 Rangos de severidad vibratoria complementaria a la tabla 3 con velocidad de rotación bajo 600 cpm. ISO 10816-3	33
5 Límites de zonas de evaluación para la norma ISO 7919-3	35
6 Tipos de acelerómetros	49
7 Requerimientos y características comparativas de los sensores para el sistema	59
8 Requerimientos y características comparativas de las tarjetas para el sistema.	60
9 Parámetros de funcionamiento motor acople reacondicionado	87
10 Datos característicos motor acople reacondicionado.....	87
11 Parámetros de funcionamiento motor banda – eje.....	88
12 Datos característicos motor banda – eje.	88
13 Parámetros de funcionamiento motor acople.....	89
14 Datos característicos motor acople.	89
15 Parámetros de funcionamiento motor ventilador.....	90
16 Datos característicos motor ventilador.	90

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Unidades de medida de la amplitud en una vibración.....	7
2	Señales sinusoidales desfasadas en 90 grados.....	8
3	Naturaleza de la vibración.....	9
4	Unidades de vibración.....	11
5	Señal en el dominio del tiempo y su correspondiente en el dominio de la frecuencia.	12
6	Desbalanceo estático a) y su respectivo espectro b).....	13
7	Desbalanceo dinámico a) y su respectivo espectro b).....	14
8	Desalineamiento angular a) y su respectivo espectro b)	14
9	Desalineamiento paralelo a) y su espectro b).....	15
10	Desalineamiento combinado a) y el espectro respectivo b)	15
11	Holgura mecánica a) y el espectro característico b).....	15
12	Espectro característico de un rozamiento.....	16
13	Espectro esperado para una correa con imperfecciones	17
14	Resonancia de la banda a) y su espectro característico b).....	17
15	Excentricidad de la polea 15a y su espectro característico 15b.....	17
16	Desalineación de poleas a) con su Espectro característico b)	18
17	Desgaste en dientes a) y su espectro característico b).....	19
18	Problema de engranajes por sobrecarga a) y el espectro característico b)	19
19	Problemas de engranajes por excentricidad y/o backlash a) y el espectro característico b)	20
20	Problemas de engranajes por desalineación a) y su espectro respectivo b).....	20
21	Componentes de un Rodamiento de Bolas Típico.	21
22	Fallas en los componentes de un rodamiento y su espectro característico.	22
23	Espectro esperado para un juego radial excesivo a) y diagrama de la posición del descanso en función de la velocidad de giro del rotor b).	23
24	Problema de torbellino de aceite a) y el espectro esperado b).	23
25	Espectro típico para la excentricidad estática en motores eléctricos asíncronos	24
26	Espectro esperado para falla por excentricidad dinámica	24
27	Problema en el fluido de líquidos a) y gases b) con su espectro característico c).	25
28	Cavitación a) y el espectro esperado para este problema b).....	25
29	Problemas por turbulencia de flujo a) y el espectro característico b).....	26
30	Clasificación de las máquinas según ISO 10816-3	30
31	Esquema general de límites de zona para la norma ISO 7919-3.....	35
32	Presentación del panel frontal 32a) y diagrama de bloques 32b).....	37
33	Representación del instrumento virtual.....	38
34	Paleta de herramientas.....	38
35	Paleta de funciones.....	39
36	Paleta de controles.....	40
37	Ventanas más utilizadas en la visualización de espectros	43
38	Criterios de selección de windows	44
39	Diagrama de bloque del sistema de medición y análisis para el diagnóstico del motor	45
40	Esquema funcional de un LVDT.....	47

41	Transductor capacitivo (Brüel & Kjar MM004).....	47
42	Esquema de un sensor de velocidad electrodinámico.	48
43	Esquema del acelerómetro piezoeléctrico.	50
44	Ubicación correcta del acelerómetro respecto al cojinete.	51
45	Orientación correcta del acelerómetro para obtener mediciones	52
46	Falta de repetitividad en la ubicación del acelerómetro	52
47	Logo del software LabVIEW de national instrument.....	60
48	Platinum low-cost industrial ICP® accelerometer, modelo número 603C01	61
49	Tarjeta de adquisición de datos cDAQ NI 9234.....	62
50	Chasis NI_cDAQ-9171	63
51	Cables de conexión: a) Cable conector sensor-tarjeta y b) Cable de transferencia de datos chasis-PC.....	64
52	Software controlador NI-DAQmx.....	64
53	Panel frontal de la pantalla principal del sistema	65
54	Diagrama de bloques de la pantalla principal del sistema.....	66
55	Panel frontal de la pantalla de adquisición, análisis y reporte de datos.....	67
56	Circuito de adquisición de datos	68
57	Configuración del bloque amplitude and levels	69
58	Configuración del bloque vibration levels	70
59	Circuito de medición y presentación.....	70
60	Modificaciones del bloque power spectrum.....	71
61	Modificaciones del bloque peak search.....	72
62	Modificación del bloque peak	73
63.	Modificación del bloque spectrum_peak_search	74
64	Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición, medición y presentación de datos del sensor 1.	75
65	Conexión de la DAQ assistant al circuito de adquisición, medición y presentación de datos del acelerómetro dos.	76
66	Configuración del bloque DAQ assistant.....	77
67	Diagrama de bloques de la presentación de espectros y tablas	78
68	Diagrama de bloques de la generación de reporte.....	80
69	Pestana de análisis y reporte del panel frontal de la pantalla adquisición, análisis y reporte.....	82
70	Diagrama de bloques para abrir el archivo de reportes	82
71	Conexión de los componentes del sistema	86
72	Motor acople reacondicionado	87
73	Motor banda – eje.....	88
74	Motor acople (WEG).....	89
75	Motor ventilador.....	90
76	Puntos, ubicación y orientación de los sensores en el motor bomba.....	91
77	Puntos, ubicación y orientación de los sensores en el motor banda - eje	91
78	Puntos, ubicación y orientación de los sensores en el motor acople	91
79	Puntos, ubicación y orientación de los sensores en el motor ventilador	91
80	Sentido radial vertical del punto 2 del motor acople reacondicionado	92
81	Pestaña de análisis y reporte del punto 2 del motor acople reacondicionado.....	93

SIMBOLOGÍA

Π	Constante o valor de pi (2,31416)	
ω	Velocidad angular	rad/s
AdB	Aceleración en decibelios	
Cpm	Ciclos por minuto	
Cps	Ciclos por segundo	
D	Desplazamiento	mm
S	Frecuencia de operación del motor	Hz
Rps	Revoluciones por segundo	
VdB	Velocidad en decibels	

LISTA DE ABREVIACIONES

Abs	Anti-lock braking system (Sistema Antibloqueo)
ADC	Conversión Analógico Digital
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AES	Estándar Avanzado de Encriptación
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
API:	Instituto Americano del Petróleo
BPF	Frecuencia de Paso de Alabes o Aspas
BPFI	Frecuencia de Paso por el Aro Interior
BPFO	Frecuencia de Paso por el Aro Exterior
BSF	Frecuencia de Paso de Elementos Podantes
BSI	Instituto Británico de Normalización
CAS	Circuito de Acondicionamiento de la Señal
CF	Factor de Cresta
DAQ o TAD	Tarjeta de Adquisición de Datos
Rms	Raíz cuadrática media, valor efectivo de una señal
DFT	Transformada Discreta de Fourier
Dpp	Desplazamiento pico-pico
E/S	Entradas Salidas
EPICS	Explicitly Parallel Instruction Computing, Informática de instrucciones paralelas explícitas
FE	Frecuencia de engranajes
FFT	Transformada rápida de Fourier
FL	Frecuencia de línea
F_n	Frecuencia natural
FTF	Frecuencia de paso de la jaula
FTF	Fundamental Traing Frequency
GPB	Bus interface de propósito general
ICP	Circuito piezoeléctrico integrado
IEC	Comisión electrotécnica internacional
IEPE	Piezoeléctricos electrónicos integrados
ISO	Organización Internacional para la Estandarización
LabVIEW	Laboratorio de Instrumentación Virtual de Bancos de Trabajos
LED	Diodo Emisor de Luz
LVDI	Transformada Diferencial Lineal Variable

Matlab	Matrix Laboratory
NEMA	Asociación Norteamericana de Manufacturas Eléctricas
NI	National Instruments
PC	Computadora Personal
PCI	Componente perimetral interconectado
PIC	Circuito integrado programable
SINAD	Signal to Noise and Distortion ratio, relación entre la señal de ruido y la distorsión
SNR	Single number ratio o reducción del ruido simplificado
THD	Distorsión armónica total
USB	bus serial universal
VDI	Asociación alemana de ingenieros
VI	Instrumento Virtual
CAD	Diseño Asistido por Computadora
IMI	Instrumento de Monitoreo Industrial
BNC	Bayonet Neill Concelman
MIL	Lámpara Indicadora de Avería
DAQmx	Software de Adquisición de datos y control
MAX	Measurement & Automation Xplorer
A	Axial
RV	Radial Vertical
RH	Radial Horizontal

ANEXOS

- A Norma ISO 10816-3
- B Norma ISO 7919-3
- C Especificaciones técnicas del platinum low-cost industrial ICP® accelerometer model 603C01.
- D Especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición de datos
- E Especificaciones técnicas del chasis NI_cDAQ-9171
- F Características técnicas del cable BNC conector sensor-tarjeta
- G Diagrama de bloques de la pantalla “ADQUISICIÓN, ANÁLISIS Y REPORTE”
- H Tablas para el diagnóstico de vibraciones
- I Hojas de reportes
- J Manual de usuario del sistema

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se ha desarrollado un sistema para el diagnóstico de equipos industriales rotativos basado en el análisis espectral de vibraciones utilizando el software LabVIEW aplicado a cuatro equipos del laboratorio de Análisis Vibracional y Alineamiento Láser de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento de la ESPOCH, el sistema incluye dos etapas.

La primera consiste en la adquisición simultánea de la señal de vibraciones desde los equipos rotativos a través de tres acelerómetros (603C01 de IMI Sensors) colocados ortogonalmente entre sí, el respectivo acondicionamiento de la misma mediante la tarjeta de adquisición de datos (cDAQ NI 9234 de National Instruments), para finalmente ser transmitida hacia el ordenador gracias a la interfaz de comunicación USB facilitada por el Chasis NI_cDAQ - 9171.

La segunda etapa consiste en la presentación de los espectros de las señales adquiridas en las tres direcciones de cada punto de medición, el análisis y la generación del reporte correspondiente en hojas del procesador de texto Word, para ello se crean varios circuitos internos en el diagrama de bloques del entorno gráfico LabVIEW. Finalmente el usuario podrá emitir el diagnóstico del estado de operación de la máquina con la ayuda de la normativa internacional sobre severidad de vibraciones, el uso tablas para el diagnóstico de vibraciones y del conocimiento especializado de los espectros característicos que emiten los diferentes estados de funcionalidad de los equipos industriales rotativos.

ABSTRACT

In this thesis a system for diagnosis of rotating industrial equipment based on vibration spectral analysis has been developed by using the LabVIEW software applied to four laboratory equipment Vibration Analysis and Laser Alignment of the School of Engineering Maintenance of the ESPOCH, the system includes two stages.

The first is the simultaneous acquisition of the vibration signal from rotating equipment through three accelerometers (IMI Sensors 603 c01) orthogonally to each other, the respective conditioning by the same data acquisition board (Cdaq ni 9234 de National Instruments), finally to be transmitted to the computer through the USB communication interface provided by the chassis NI_cDAQ – 9171.

The second step consists in the presentation of the spectra of the signals acquired in the three directions of the each measurement, the analysis and report generation of the corresponding in Word text-processor sheet, for it several internal circuits are created in the block diagram of the LabVIEW graphical environment. Finally the user can give the diagnosis of the state of operation of the machine with the help of international standards for vibration severity, using tables for vibration diagnosis and specialized knowledge of the characteristic spectra emitted by different states of functionality of rotary industrial equipment.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los constantes retos que nos impone el mundo moderno en cuanto a los avances tecnológicos y en el atesoramiento de los recursos energéticos en todos los campos y más en un campo tan competitivo como lo es el industrial, obligan a quienes están al frente del mismo a aprovechar de manera oportuna las potenciales ventajas que proporcionan los avances tecnológicos, lo cual sólo es posible incorporando estos adelantos de la ciencia a su campo de acción.

El mantenimiento como parte fundamental para el desarrollo de una empresa no puede soslayar esta realidad, por tanto debe considerar la implementación de nuevas estrategias para el mantenimiento predictivo-proactivo específicamente, que permitan el monitoreo continuo de las condiciones de salud de las máquinas de una planta, además realizar el diagnóstico de fallas de las mismas.

Todo ingeniero de mantenimiento debe tener a la mano una herramienta tecnológica con la cual obtenga que los equipos que estén bajo su control cumplan satisfactoriamente su vida útil con la que han sido diseñados. Las técnicas modernas en el mantenimiento correctamente aplicadas, con el instrumento adecuado y personal capacitado logran el incremento de la disponibilidad, fiabilidad y seguridad en los equipos, lo que finalmente trasciende para el incremento de la calidad y productividad industrial que es la exigencia en una planta.

Una de las alternativas y más propicias de la actualidad para llevar a cabo el mantenimiento predictivo-proactivo es el análisis de vibraciones mecánicas la cual sirve para la detección de problemas relacionados con: desbalance, desalineamiento, problemas eléctricos, ejes doblados, problemas relacionados con frecuencias de fallo de componentes de máquinas (rodamientos, piñones, poleas, correas, lubricación, motores, etc.).

Con el desarrollo de éste trabajo se pretende presentar un sistema para detectar y predecir anomalías de manera temprana, monitoreando señales de vibración, a través del software

LabVIEW existente en la institución, pues cualquier defecto que presenten los equipos será mostrada por el aumento y cambio de la forma de onda con el espectro de velocidad respectivo puesto que el sistema para el análisis considera o detecta picos y frecuencias específicas y con esto generar el reporte del estado de la máquina.

La tesis se enfoca hacia las vibraciones en motores del laboratorio de Análisis Vibracional y Alineamiento Láser de la ESPOCH, el texto y los métodos analíticos empleados son compatibles con el estudio de vibraciones en sistemas mecánicos de otras máquinas.

1.2 Justificación

Todos los motores emiten una cierta vibración natural independientemente de su antigüedad o no, se encuentren en buen o mal estado. Estas vibraciones van modificándose conforme una o varias fallas van ocurriendo en el tiempo, siendo el uso o desuso de estos el origen que genera un desgaste en sus piezas internas que se desencadenan en problemas.

El alto costo como también su arquitectura cerrada de los instrumentos para la recolección y análisis de datos de vibraciones y señales de corriente, han llevado a buscar nuevas alternativas para lograr este cometido. Una herramienta poderosa, flexible y más económica para la adquisición, análisis y presentación del diagnóstico lo constituye el software LabVIEW que nos ofrece la National Instruments.

Dado que la ESPOCH se encarga de formar profesionales de alta calidad para poner al servicio de la actividad productiva de las empresas del país es de imprescindible importancia que sus laboratorios de enseñanza vayan a la par con los adelantos tecnológicos en cuanto al incremento de la productividad a bajos costos y el cuidado del medio ambiente.

Entonces la ejecución de esta tesis, encuentra su justificación en la necesidad que tienen los estudiantes de Ingeniería de Mantenimiento de contar con herramientas modernas que conlleven a avanzar a la par con los adelantos tecnológicos que permita mejorar el proceso enseñanza- aprendizaje y fundamentar los conocimientos de manera práctica y eficiente a través de la adaptación de herramientas informáticas existentes en la escuela.

Lo anterior expuesto representaría un aporte significativo a la institución ya que se alcanzaría un nuevo equipo de diagnóstico de problemas producidos en la maquinaria industrial a través del análisis de vibraciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Determinar problemas en equipos industriales mediante análisis vibracional a través del software LabVIEW.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Realizar un estudio de los sistemas de detección de problemas en equipos industriales.

Desarrollar una alternativa de un sistema de diagnóstico de problemas en equipos industriales.

Identificar los alcances y limitaciones del sistema propuesto.

Diseñar y construir las plataformas para la adquisición, presentación, análisis y generación de reporte de datos en LabVIEW y verificar el buen funcionamiento de las mismas.

Realizar las pruebas correspondientes en el laboratorio de Análisis Vibracional y Alineamiento Láser de la ESPOCH.

Emitir los resultados de los problemas encontrados en los equipos de dicho laboratorio.

Elaborar una guía de prácticas para la utilización del sistema.

Emitir las respectivas conclusiones, recomendaciones y las propuestas de nuevos trabajos relacionados que permitan mejorar el sistema.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Equipos industriales

Desde hace mucho tiempo atrás el ser humano se ha planteado la necesidad de realizar trabajos que sobrepasan su propia capacidad física o intelectual, como por ejemplo mover grandes rocas, transportar objetos o personas a grandes distancias, resolver de manera rápida un gran número de problemas, etc. Para hacerse frente a estos grandes retos se inventaron las máquinas, las cuales han tenido una importante evolución histórica empezando por la invención de las máquinas sencillas como la palanca, la cuña, la rueda, etc., continuando con la evolución de la ingeniería térmica y eléctrica que puede decirse que empieza con el dominio del fuego hasta llegar en la actualidad a tener grandes equipos totalmente automáticos.

2.1.1 *Concepto de equipo o máquina industrial.* Aparato o conjunto de elementos que de manera sincronizada y simultáneamente son capaces de efectuar un trabajo o de llevar a cabo una función predefinida, el funcionamiento puede ser dirigido por un operador o de forma autónoma. También se considerará como máquina a un conjunto de equipos que, para llegar a un mismo resultado, están dispuestas y accionadas para funcionar solidariamente. (CAMPOS, 2008)

2.1.2 *Principales equipos industriales.* En la actualidad existe un sinnúmero de equipos industriales que se utilizan para servicios específicos o varios a la vez, una clasificación completa sería muy extensa y compleja debido a que constantemente se está adecuando máquinas para nuevos servicios.

Dada la naturaleza de la tesis, para su desarrollo nos enfocaremos con mayor detalle en las máquinas en las cuales los elementos u órganos fundamentales para la transmisión de energía son rotantes, y que dicho sea de paso son las de mayor importancia y más utilizadas en el campo productivo industrial ya sea por la facilidad de maniobrabilidad o el espacio que ocupan con referencia a las de transmisión de energía por traslación.

2.1.3 *Sistemas de transmisión de potencia.* Su función es transmitir el movimiento desde un punto hasta otro distinto para de esa manera prolongar líneas de potencia. También llamado

enlaces de potencias y son: eje con acople, bandas con polea, ruedas dentadas, cadenas cremallera.

2.1.3.1 Transmisión mediante ejes con acople. También llamado acoplamiento de la flecha, se utiliza para transmitir el movimiento giratorio y la torsión de un motor, hacia un utilizador, como por ejemplo a una bomba.

Los sistemas de transmisión mediante ejes pueden tener enlaces flexibles y rígidos; siendo los más utilizados los acoples flexibles por ende objeto de estudio.

Nota: *Acoplamientos flexibles.* El propósito es compensar los cambios de temperatura en los acoplamientos y las flechas y permitir el movimiento axial de las mismas de manera que no se interfieran entre sí mientras se transmite la potencia, se usan comúnmente para transmitir el momento o par impulsor entre el motor y una bomba.

2.1.3.2 Transmisión por poleas con correa. (Tecnología Sefarad, 2010) Se trata de dos ruedas situadas a cierta distancia que giran a la vez por efecto de una correa. Las correas suelen ser de cintas de cuero flexibles y resistentes. De acuerdo al tamaño de las poleas se tienen sistemas reductores o multiplicadores de velocidad, la velocidad (n) de las poleas y la relación de transmisión se puede calcular con la siguiente formula:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_1}{d_2} \quad (1)$$

Donde:

n_1 = velocidad de la polea motriz,

n_2 = velocidad de la polea conducida,

d_1 = diámetro de la polea motriz,

d_2 = diámetro de la polea conducida.

2.1.3.3 Transmisión por engranajes. (Tecnología Sefarad, 2010) Los engranajes son ruedas dentadas que encajan entre sí, de modo que unas ruedas transmiten el movimiento circular (motriz) hacia otras ruedas (conducidas).

Es importante que el tamaño de los dientes de todos los engranajes sean iguales, según sea el número de dientes de las ruedas dentadas se convierte en un sistema reductor o multiplicador.

Las velocidades (n) y la relación de transmisión (i) se pueden calcular, a partir de su número de dientes así,

$$i = \frac{z1}{z2} = \frac{n2}{n1} \quad (2)$$

Donde:

n1 = velocidad del engranaje de entrada,

n2 = velocidad del engranaje de salida,

Z1 = número de dientes del engranaje de entrada,

Z2 = número de dientes del engranaje de salida.

2.2 El análisis vibracional y la fuente de vibraciones (problemas) en equipos industriales.

El análisis vibracional es sin duda una de las herramientas más importantes y poderosas con la que cuentan los mantenimientos predictivo y proactivo. Cerca del 90% de daños de las en máquinas rotativas están precedidas por un cambio en las vibraciones de las mismas. (CALLE, 2009 págs. 89-90)

La medición y análisis de vibraciones en conjunto con otras técnicas es utilizado en todo tipo de industrias como práctica de diagnóstico de fallas y evaluación de la integridad de máquinas y estructuras.

En el caso de los equipos rotatorios, la ventaja que presenta el análisis vibratorio respecto a otras técnicas como tintas penetrantes, radiografía, ultrasonido, etc., es que la evaluación se realiza con la máquina funcionando, evitando con ello la pérdida de producción que genera una detención.

2.2.1 Vibración. Se puede considerar como un movimiento trepidatorio, de vaivén u oscilatorio de pequeña amplitud que experimenta un cuerpo entero en torno a su posición de equilibrio, al cual llegará cuando la fuerza que provoca la vibración sea igual a cero, lo que implica que todas las partes constitutivas del elemento se muevan solidarias en la misma dirección y sentido. (CALLE, 2009 págs. 89-90)

Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual plasman cada una de sus características. De acuerdo a esto, las máquinas presentan su propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de cada uno de sus componentes. Por tanto, una señal de

vibración capturada de una máquina es la suma de la vibración de cada una de sus componentes. (DAZA, 2007 págs. 12-15)

2.2.1.1 Elementos de una vibración. Los elementos de toda vibración son: frecuencia - período, amplitud y fase.

a) Período y frecuencia. (A-MAQ S.A., 2005 págs. 12-15) El período de una vibración es el tiempo requerido para cumplir un ciclo, está expresado en minutos, segundos, etc. (ver figura 1); mientras que la frecuencia al ser el recíproco podemos decir que es el número de veces que el cuerpo regresa a su posición inicial (ciclos) en una unidad de tiempo y se expresa en ciclos por minuto (cpm), ciclos por segundo (cps o Hz), etc.

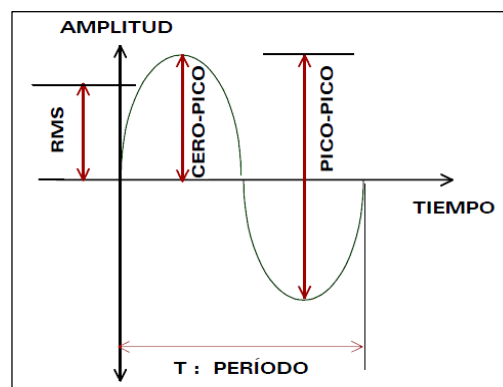
b) Amplitud. (CUEVAS, 2008 pág. 32) Es la cantidad de movimiento que puede tener una masa desde su posición neutral, se puede medir en valores cero-pico, pico-pico y RMS, (ver figura 1). Este último es también llamado valor efectivo, y es el más utilizado en la medición de vibraciones porque está asociado a la potencia de la vibración, el cual se determina de forma discreta como:

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_N^2}{N}} \quad (3)$$

En el caso particular de una vibración armónica resulta:

$$Y_{RMS} = 0,707Y_{PICO} \quad (4)$$

Figura 1. Unidades de medida de la amplitud en una vibración

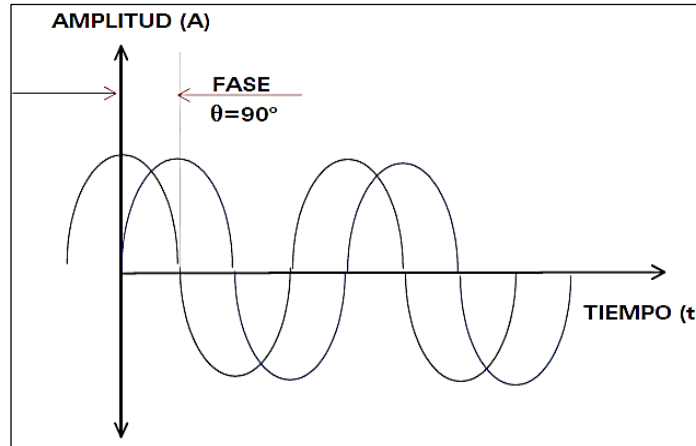


Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.11

c) Fase. (DAZA, 2007 pág. 14) La fase realmente es una medida de tiempo entre la separación de dos señales, la cual puede ser relativa o absoluta. Generalmente es expresada

en grados. La figura 2 muestra dos señales sinusoidales de igual amplitud y periodo, pero separadas 90 grados, lo cual indica que ambas curvas están desfasadas 90 grados.

Figura 2. Señales sinusoidales desfasadas en 90 grados



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.12

Un elemento de relativa importancia para el diagnóstico de máquinas y estructuras es el llamado Factor de Cresta (CF), expresado por el cociente entre el valor Pico y el valor RMS.

$$CF = \frac{Y_{PICO}}{Y_{RMS}} \quad (5)$$

2.2.1.2 Tipos de vibración. (MOROCHO, 2008 pág. 2) En general existen dos tipos de vibraciones, libres y forzadas.

a) Vibración libre. Ocurre cuando un cuerpo o sistema oscila bajo la acción de fuerzas inherentes al mismo (su inercia y elasticidad), es decir no existe ninguna fuerza exterior aplicada o estas se anulan mutuamente o entre sí. En este caso se dice que el sistema vibra a su frecuencia natural.

b) Vibración forzada. Ocurre cuando el cuerpo o sistema oscila excitada por fuerzas externas que se mantienen durante el movimiento. El cuerpo vibra a la frecuencia de la fuerza de excitación.

2.2.2 Sistema vibratorio. (MOROCHO, 2008 pág. 2) Para que una vibración mecánica ocurra, se requieren de por lo menos dos elementos que almacenen energía.

- El elemento inercial (masa) que almacenará energía cinética, y
- El elemento elástico (resorte) que almacenará energía potencial.

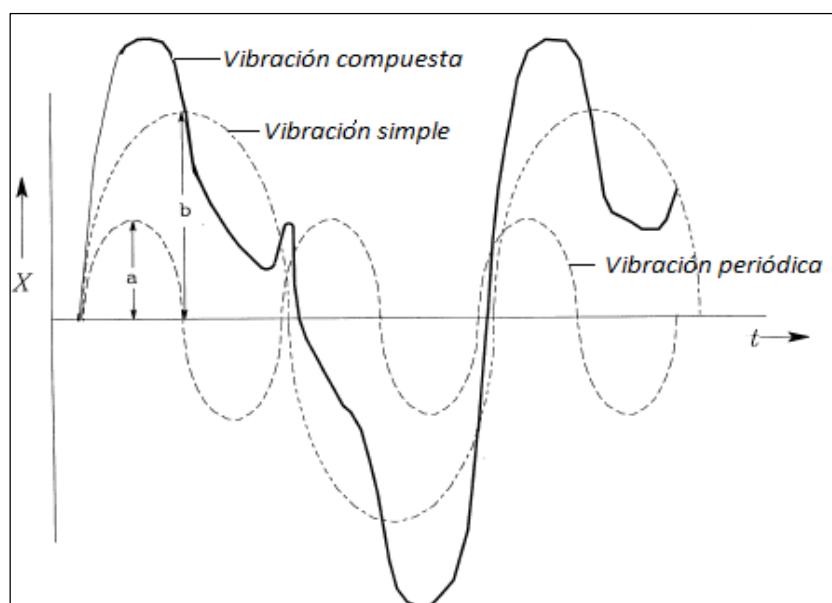
De ahí que se puede señalar que todo sistema que posea masa y elasticidad es capaz de intercambiar energía entre esos dos elementos o simplemente vibrar u oscilar de acuerdo al número de grados de libertad (tres ejes ortogonales x, y, z, y de rotarse en torno a los mismos ejes) que éste posea.

Entonces el movimiento vibratorio (por más complejo que sea) de un cuerpo entero queda completamente definido como una combinación de los seis movimientos individuales, por lo que se dice que un cuerpo posee 6 grados de libertad.

2.2.3 Naturaleza de la vibración. (A-MAQ S.A., 2005 pág. 12) Las vibraciones, pueden ser de naturaleza simple o armónica, periódica, aleatoria y compuesta.

- a) Vibración simple o armónica.** Es la más simple, caracterizadas por las ondas sinusoidales que son representación de las oscilaciones puras (a).
- b) Vibración periódica.** Es el movimiento de vaivén que se repite cada cierto período de tiempo, como se puede observar en la figura 3. A manera de ejemplo podemos citar un problema de un sistema de transmisión por ruedas dentadas (b).
- c) Vibración compuesta.** Una señal de vibración compuesta, resulta de la suma de varias señales sinusoidales (ver figura 3) que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, más todos los golpeteos y vibraciones aleatorias.

Figura 3. Naturaleza de la vibración



Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p.31

2.3 Ecuaciones de movimiento (unidades de vibración).

Al proceder a la medición de las vibraciones es necesario decidir la magnitud. Si se registra la posición o el desplazamiento de un cuerpo que está sometido a un movimiento armónico simple versus el tiempo en una gráfica, la curva resultante será una onda sinusoidal la cual denota tres magnitudes físicas (ver figura 4).

a) Desplazamiento. (SOLIS, 2005 pág. 10) La curva descrita por esta función se trata de la onda sinusoidal trigonométrica (ver figura 4). Es la medida de las posiciones extremas de la superficie que vibra, cualquier medición en este sentido tendrá que ser realizada a una frecuencia específica de acuerdo a los distintos transductores. Por ejemplo, para los transductores de proximidad el rango de frecuencias efectivo aproximado está entre 0 y 600 Hz, y para los transductores de contacto el rango se ubica entre 0 y 200 Hz.

La ecuación que gobierna esta magnitud física es la siguiente:

$$s = D * \sin(\omega t) \quad (6)$$

Donde:

s = desplazamiento instantáneo,

D = desplazamiento máximo o pico,

ω = frecuencia angular en rad/s, y

t = tiempo.

b) Velocidad. (SOLIS, 2005 pág. 11) Representa la cuantificación de cuán rápido la superficie vibrante alcanzan sus posiciones extremas. El rango de frecuencias efectivo para transductores de velocidad se ubica entre 10 y 200 Hz aproximadamente. La medición de la velocidad de vibración es de mucha utilidad cuando se trata de detectar fallas ocasionadas por problemas de fatiga o desgaste de componentes.

La velocidad de vibración se obtiene a partir de derivar la ecuación del desplazamiento respecto al tiempo, y se tiene:

$$V = \frac{\partial s}{\partial t} = \omega \cdot D \cdot \cos(\omega t) \quad (7)$$

Donde:

V = velocidad instantánea.

La curva de la velocidad también es sinusoidal, pero, como ésta es descrita por el coseno, se tiene una onda desfasada en 90 grados (ver figura 4).

c) Aceleración. (SOLIS, 2005 pág. 13) Expresa la razón de cambio de la velocidad del objeto desde la posición de equilibrio hasta los extremos.

Los transductores para la medición de la aceleración de vibraciones con alta sensibilidad poseen un rango de frecuencias de entre 0,2 Hz y 500 Hz aproximadamente, y los de más baja sensibilidad exhiben un rango de frecuencias de entre 5 Hz y 200 Hz.

Sus unidades de medición son: mm/s² o m/ s², sin embargo por acuerdo internacional, los niveles de aceleración de vibraciones en máquinas rotatorias son expresados en gravedades (g's) (constante gravitacional de la tierra a nivel del mar), donde: $1g = 9.809 \frac{m}{s^2}$

La ecuación que describe esta magnitud es:

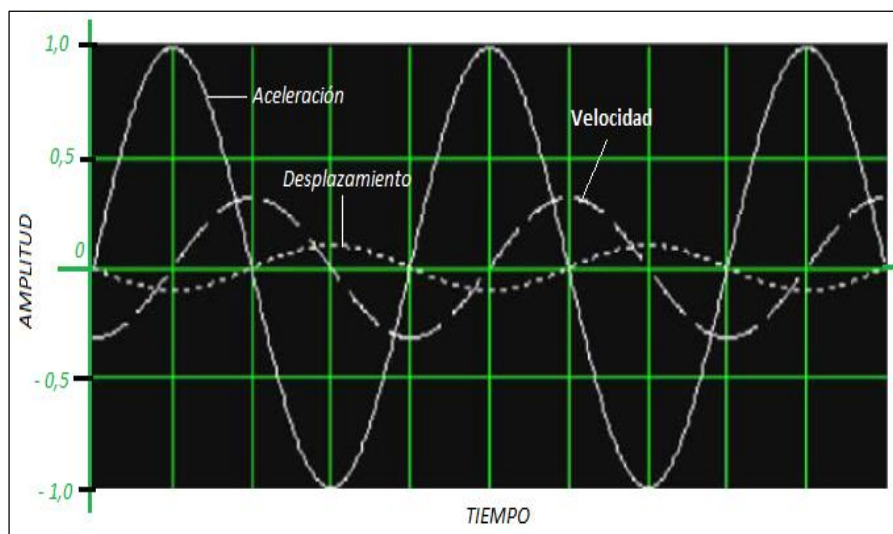
$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2} = -\omega^2 \cdot D \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (8)$$

Donde:

a = aceleración instantánea.

La gráfica de esta ecuación también resulta ser una senoide, sólo que desfasada en 90 y 180 grados respecto de la velocidad y desplazamiento respectivamente (ver figura 4).

Figura 4. Unidades de vibración



Fuente: Autores

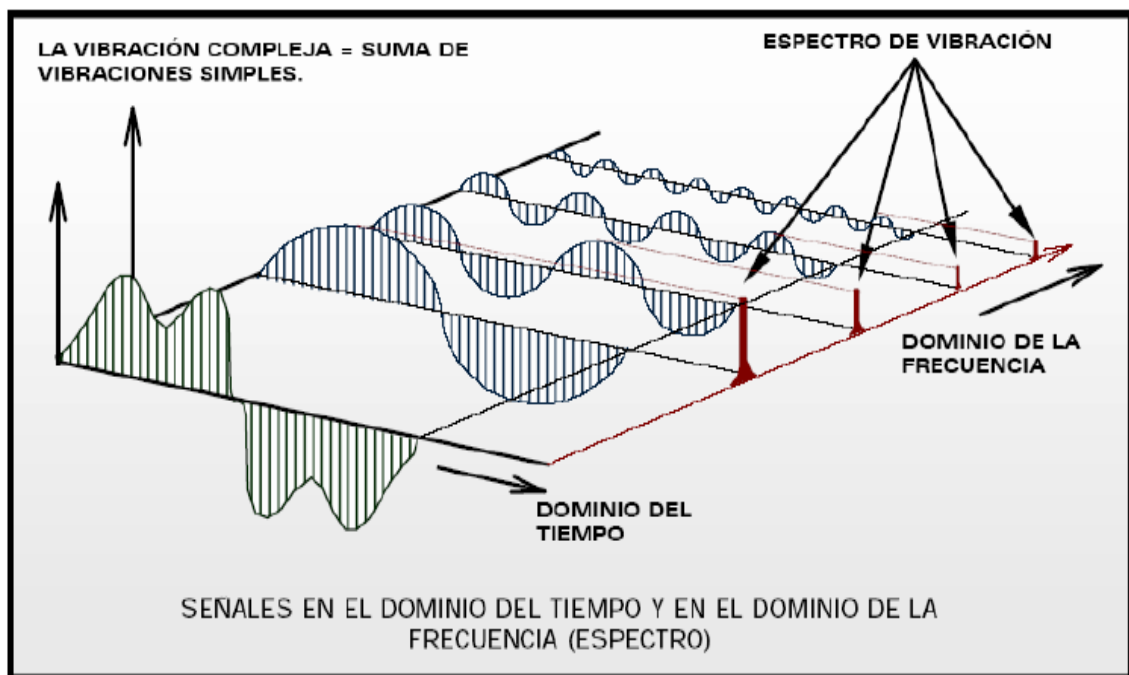
2.4 La transformada rápida de Fourier (FFT).

En la actualidad hay varias formas de realizar un estudio de vibraciones entre las cuales se destaca observar esta señal en el dominio de la frecuencia. Esta es la gráfica de amplitud vs frecuencia y se conoce como espectro, en la misma se tiene la frecuencia de cada excitación y la amplitud que esta produce separadamente.

El matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 -1830) fue quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos. En 1965, presentó el algoritmo de la (FFT), que permitió simplificar de forma importante el tiempo de cálculo pues emplea solamente $N \cdot \log N$ términos además de reducir significativamente el error.

El analizador de espectros que trabaja con la FFT captura una señal (vibración mecánica) desde una máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje x de la frecuencia (espectro). Puede notarse claramente la señal compleja (ver figura 5 en color verde), capturada desde una máquina. A dicha señal se le calculan todas las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo (vistas en azul) y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia (vistas en rojo) (DAZA, 2007 págs. 31-32).

Figura 5. Señal en el dominio del tiempo y su correspondiente en el dominio de la frecuencia.



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.14

2.5 Fuentes de vibraciones (patologías) en equipos industriales y el análisis vibracional.

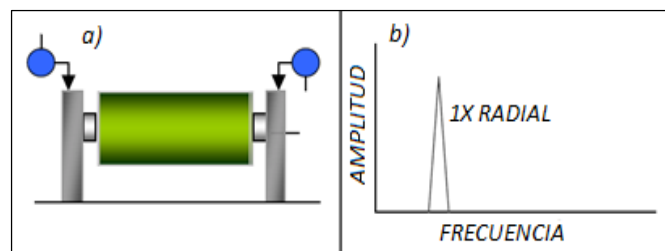
Todas las máquinas vibran como parte normal de su funcionamiento y con independencia de su antigüedad o modernidad. Toda vibración es nociva para los equipos industriales, aunque existen ciertos niveles que son catalogados como normales o permisibles, entonces, lo que nos queda es realizar el monitoreo y las correcciones respectivas para que el nivel de estas vibraciones se mantengan en los niveles tolerables.

A continuación se presenta la descripción de los diferentes indicadores de problemas (patologías) en maquinaria industrial y sus espectros característicos:

2.5.1 Desbalanceo. (A-MAQ S.A., 2005 págs. 17-18) O simplemente desbalance, se trata de la distribución desigual de masa sobre el centro de rotación de la máquina. Constituye una de las fuentes más comunes de problemas de vibraciones en maquinarias y básicamente existen dos tipos los mismos que se explican a continuación:

a) Desbalanceo estático. Se produce generalmente debido al desgaste superficial radial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro. Su espectro característico presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1X RPS del rotor en sentido radial (ver figura 6b).

Figura 6. Desbalanceo estático a) y su respectivo espectro b)



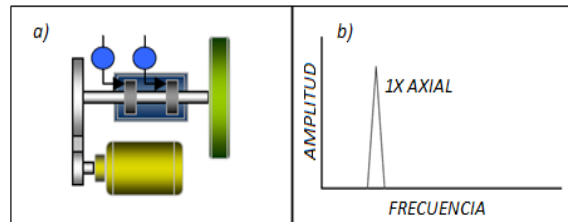
Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.17

Para corregir esta patología se recomienda balancear el rotor en un solo plano (en el centro de gravedad) (ver figura 6a) con la masa adecuada y en la posición angular calculada con un equipo de balanceo.

b) Desbalanceo dinámico. Ocurre en rotores medianos y largos. Se debe a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor. El espectro presenta vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1X del rotor en sentido axial (ver figura 7b).

Para corregir la falla se recomienda balancear el rotor en dos planos con masas adecuadas y en las posiciones angulares calculadas con un equipo de balanceo dinámico (ver figura 7a).

Figura 7. Desbalanceo dinámico a) y su respectivo espectro b)



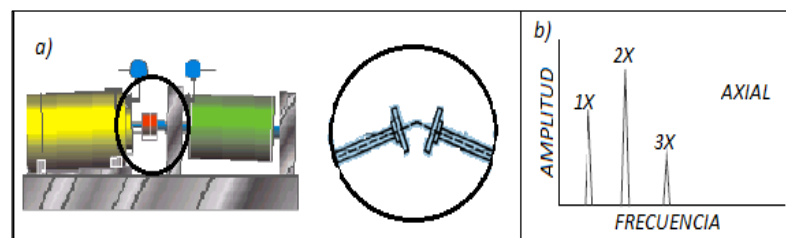
Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.18

2.5.2 Desalineación. (A-MAQ S.A., 2005 págs. 19-22) Se define como la falta o la no coincidencia de los centros de dos elementos que se acoplan. Se puede presentar entre rodamientos, entre ruedas dentadas, etc. y con mayor frecuencia en los acoples de dos máquinas, es decir entre la unidad conductora y la conducida.

A la desalineación se le atribuye aproximadamente el 50 % de los problemas de vibraciones que se presentan en la industria. Podemos encontrar los siguientes tipos de desalineaciones:

a) Desalineamiento angular. Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos mediante un acople, no son paralelos (ver figura 8a). Este problema está caracterizado por altas vibraciones axiales 1X RPS y 2X RPS (ver figura 8b) con desfase de 180 grados a través del acople. También se presenta 3X RPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople. Para corregirlo, el conjunto motor-rotor deben alinearse, empleando un equipo de alineación adecuado.

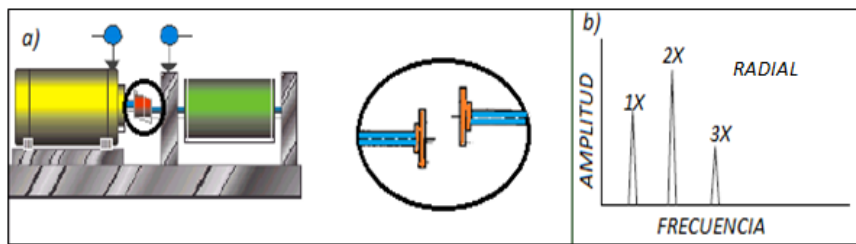
Figura 8. Desalineamiento angular a) y su respectivo espectro b)



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.21

b) Desalineamiento paralelo. Los ejes motor y conducido están paralelos, pero no son colineales (ver figura 9a). Se pueden detectar altas vibraciones radiales a 2X RPS, predominante, y a 1X RPS (Fig. 9b), con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando aumenta la severidad, genera picos en armónicos superiores (4X, 8X).

Figura 9. Desalineamiento paralelo a) y su espectro b)

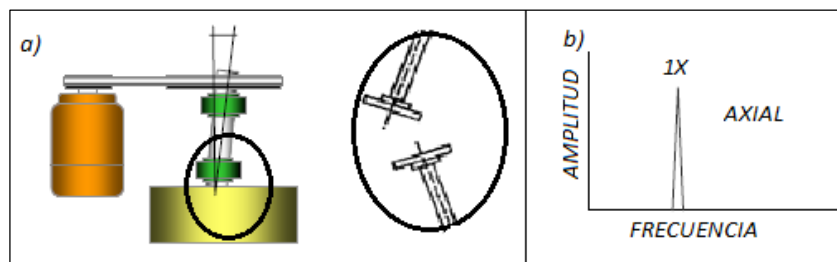


Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.22

Se debe alinear el conjunto para corregir el daño, empleando un equipo de alineación adecuado.

c) Desalineamiento combinado. En una máquina con transmisión de poleas, la mala posición de las chumaceras puede evitar que el eje se acomode correctamente, lo cual genera vibraciones anormales en sentido axial y radial. La excitación del pico representativo de la velocidad (1X RPS), es especialmente en sentido axial (Fig. 10b). Para eliminar este inconveniente se debe verificar que las chumaceras queden completamente paralelas entre sí.

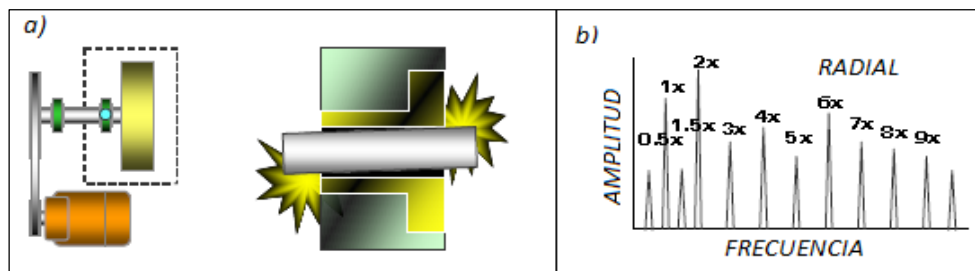
Figura 10. Desalineamiento combinado a) y el espectro respectivo b)



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.22.

2.5.3 Holgura mecánica. (A-MAQ S.A., 2005 pág. 21) Sucede cuando existe un excesivo juego radial en los descansos ya sea por rodamientos o hidrodinámicos, a causa de la soltura del rotor en el eje o debido al ajuste por escasa interferencia, falta de apriete en la camisa del descanso y por la presencia de pernos de anclaje sueltos (ver figura 11a).

Figura 11. Holgura mecánica a) y el espectro característico b)



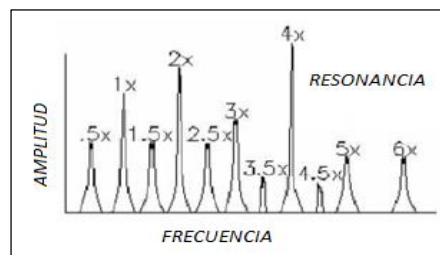
Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.21.

El espectro vibratorio de este problema está caracterizado por la presencia de múltiples armónicos en dirección radial, en el espectro predomina la 2x, mientras más severa sea la soltura mayor presencia de armónicos se tendrá. En algunos casos, se tendrán subarmónicos a fracciones enteras de la velocidad de giro (1/2, 1/3, etc.) y sus múltiplos, como se muestra en la figura 11b.

2.5.4 Rozamiento. (DAZA, 2007 págs. 83-84) Es un problema que se produce por el roce entre el rotor y el estator. Existen 2 clases de roces, el parcial y el total. Se dice que se trata de roce total, cuando ocurre durante toda la revolución lo cual puede hacer girar al eje en contra rotación es decir se produce el paro de la máquina en el que no implicaría un análisis vibracional; mientras que cuando el rotor toca el estator sólo ocasionalmente se habla de roce.

El espectro característico del rozamiento parcial se compone de múltiples armónicos de la velocidad de giro parecido al de una soltura mecánica o desalineamiento severo. Otra característica es que puede generar subarmónicos enteros de la velocidad de giro como en el caso de una soltura severa, pero la diferencia está en que estos subarmónicos pueden ser menores al de problemas de soltura llegando hasta X/5 de la velocidad de giro (ver figura 12). Además suele presentarse alguna condición de resonancia y predomina en dirección radial.

Figura 12. Espectro característico de un rozamiento

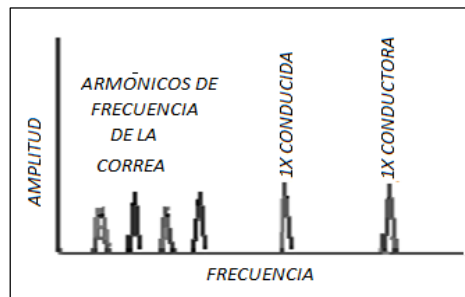


Fuente: Análisis de vibraciones, espectros y problemas. p.3

2.5.5 Problemas en sistemas de transmisión por correa y poleas. Llamados también vibraciones en la correa solamente, puesto que cualquiera que sea el problema (en correa o en poleas) siempre se manifestará componentes de vibración en la correa. A continuación se detallan los diferentes problemas que se presentan en estos sistemas:

a) Problemas de desgaste, distensión o imperfecciones de la correa. (DAZA, 2007 págs. 84-86) Estos problemas pueden ser ocasionados por la presencia de correas agrietadas, imperfecciones en correas y desprendimiento de las mismas asociadas al sobrepaso de la vida útil, o desgaste excesivo de la banda. La frecuencia de la correa es siempre menor a las rpm de las poleas y no predomina en el espectro, suele presentar 2 o 3 y hasta 4 armónicos.

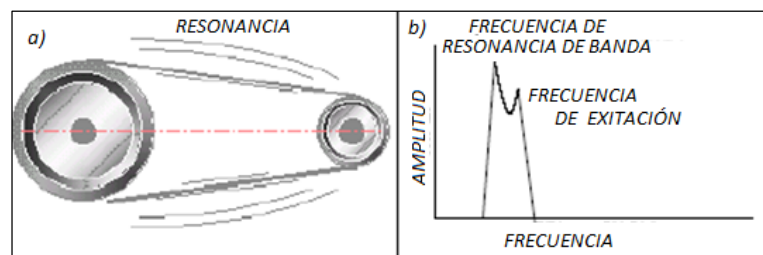
Figura 13. Espectro esperado para una correa con imperfecciones



Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p.84

b) *Resonancia de banda.* (A-MAQ S.A., 2005 pág. 25) Ocurre cuando la frecuencia natural de la correa coincide o se aproxima a las RPS de la máquina conductora o conducida (ver figura 14a). Genera altas amplitudes de la frecuencia de resonancia y frecuencia de excitación de banda, predominando la frecuencia de resonancia, como lo muestra la figura 14b. Este inconveniente se puede corregir modificando la tensión o la longitud de la banda, con lo cual se logra modificar su frecuencia natural.

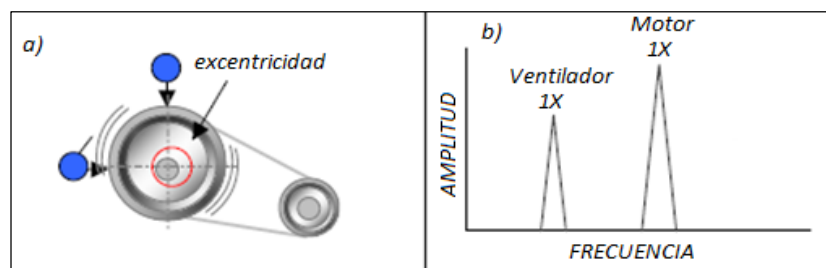
Figura 14. Resonancia de la banda a) y su espectro característico b)



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.25

c) *Excentricidad de poleas.* (A-MAQ S.A., 2005 pág. 23) Ocurre cuando los centros de rotación y geométrico de la polea no coinciden (ver figura 15a). Genera alta vibración a 1x RPS de la polea excéntrica en sentido radial, como se muestra en la figura 15b. Para corregir este inconveniente lo más recomendable es sustituir la polea.

Figura 15. Excentricidad de la polea 15a y su espectro característico 15b

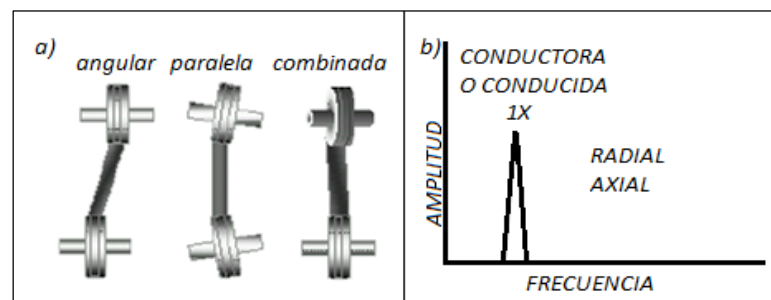


Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.23

d) Desalineamiento de poleas. (A-MAQ S.A., 2005 pág. 30) Este defecto puede tener su origen en un montaje defectuoso de poleas en el que los ejes de las mismas no estén alineados o que las caras no estén paralelas. La desalineación de poleas, puede ser angular, paralela o una combinación de ambas (ver figura 16a), todas producen un prematuro desgaste tanto de correas como de las mismas poleas.

Produce picos de vibración a 1x RPS de la polea conductora o conducida en dirección radial y axial, esta última en mayor amplitud (ver figura 16b). Para dar solución a este problema se recomienda alinear las poleas tanto angular como paralelamente.

Figura 16. Desalineación de poleas a) con su Espectro característico b)



Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.30

2.5.6 Problemas en sistemas de transmisión por engranajes. Los sistemas de transmisión por ruedas dentadas emiten tonos prominentes que generan espectros con armónicos 1X y 2X RPS radial de la rueda conductora y conducida, adicionalmente muestran bandas laterales alrededor de la Frecuencia de Engrane (FE) o sus siglas en inglés (GMF), independientemente de su estado de salud. (A-MAQ S.A., 2005 pág. 26)

Así un sistema nuevo empezará generando picos elevados a estas frecuencias hasta que los dientes cumplan con el período normal de asentamiento, lo que produce una disminución en la amplitud de los picos, manteniéndose así por un buen tiempo hasta que empiece el período de desgaste, con lo cual empiezan otra vez a generar picos cada vez más elevados a medida que vaya progresando el desgaste. (DAZA, 2007 pág. 94)

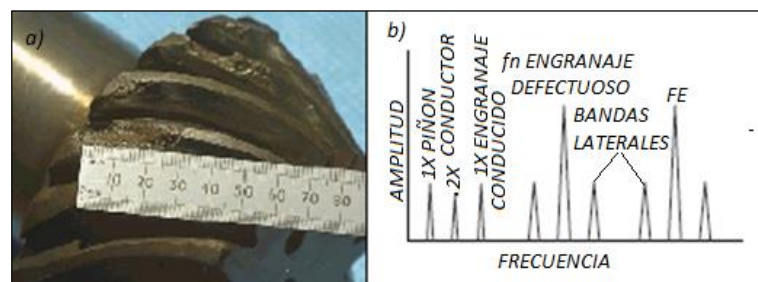
Consejos que resultan prácticos al momento de medir vibraciones en las cajas reductoras son:

- Para engranajes rectos, la mejor señal se obtendrá en la posición radial.
- En engranajes helicoidales y otros que tengan ángulo de contacto, la señal será la axial.
- El tipo de falla también afecta de forma importante la ubicación de la medición.
- Un engranaje suelto, con una chaveta gastada pueden causar una alta vibración radial.
- El transductor debe ser ubicado lo más cercano posible al engrane.

Los principales problemas en cajas de engranajes son:

a) Desgaste en dientes. (A-MAQ S.A., 2005 pág. 26) Las causas más comunes que generan este problema pueden ser la operación más allá de la vida útil del engranaje, contaminación del lubricante, presencia de elementos extraños en la caja de engranajes o montaje defectuoso (ver figura 17a). Su espectro característico muestra bandas laterales alrededor de la frecuencia natural (f_n) de vibración del engrane defectuoso y con espaciamientos de 1X RPS del mismo. Si el daño es severo, habrá sobreexcitación de la FE (ver figura 17b). La solución recomendada para este problema es cambiar el engranaje o rectificarlo si es el caso.

Figura 17. Desgaste en dientes a) y su espectro característico b)

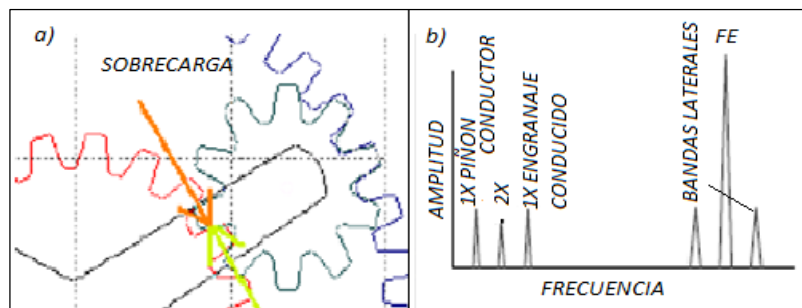


Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.26

b) Sobrecarga. (A-MAQ S.A., 2005 pág. 27) En esta situación todos los dientes están trabajando a sobrepresión de forma continua (ver figura 18a). Su espectro muestra la FE altamente excitada y bandas elevadas a su alrededor (ver figura 18b).

La solución sería disminuir la carga si estuviere en exceso o buscar algún elemento defectuoso tales como buje, rodamiento, etc. o fallas en la lubricación que estén dificultando el movimiento.

Figura 18. Problema de engranajes por sobrecarga a) y el espectro característico b)

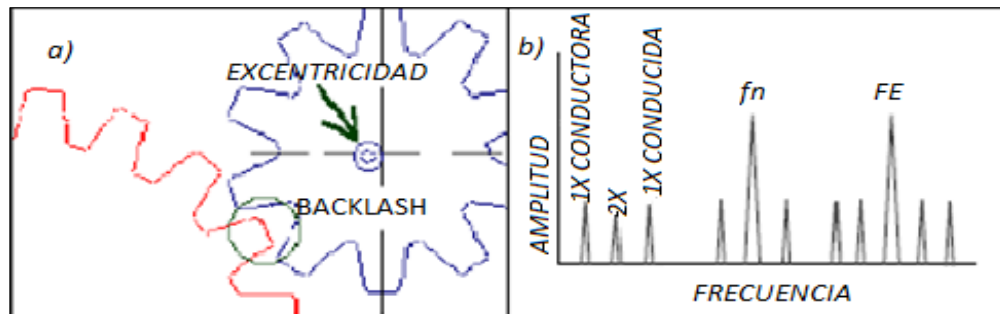


Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.27

c) Excentricidad y/o backlash. (A-MAQ S.A., 2005 págs. 27-28) Los dos problemas se producen simultáneamente, o si se quiere se puede decir que el primero causa el segundo.

La excentricidad ocurre cuando el centro de simetría no coincide con el centro de rotación del engrane, mientras que el backlash se produce cuando al terminar el contacto entre dos dientes, dos siguientes no entran en contacto de manera inmediata (ver figura 19a). El espectro muestra un aumento considerable de las bandas laterales alrededor de la FE y f_n . Para corregir el problema se recomienda reensamblar o reemplazar el engranaje (ver figura 19b).

Figura 19. Problemas de engranajes por excentricidad y/o backlash a) y el espectro característico b)

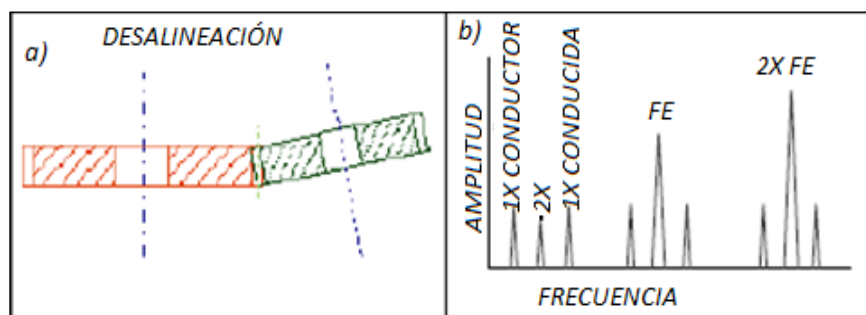


Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.27

d) Engranaje desalineado. (A-MAQ S.A., 2005 pág. 28) Ocurre cuando las ruedas dentadas han sido ensambladas con errores de alineación o sus ejes no están paralelos (ver figura 20a). Su espectro casi siempre muestra excitación de los armónicos 2X FE, 3X FE o mayores, con la presencia de bandas laterales a 1X RPS de la rueda como se muestra en la figura 20b.

La solución comprende la alineación del conjunto.

Figura 20. Problemas de engranajes por desalineación a) y su espectro respectivo b).

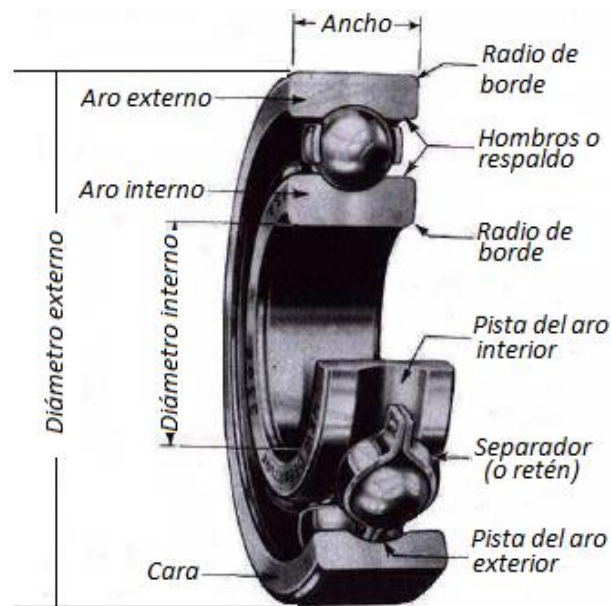


Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.28

2.5.7 Problemas en rodamientos. (DAZA, 2007 págs. 87-95) Los rodamientos son elementos de sacrificio empleados para minimizar los efectos de nocivos de la fricción.

Todos sus elementos (ver figura 21) están sujetos a desgaste debido a su funcionamiento.

Figura 21. Componentes de un Rodamiento de Bolas Típico.



Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p.93

Las anomalías de los rodamientos presentan frecuencias de vibraciones características que se calcula con la ayuda de la tabla del anexo H y que se originan cuando los elementos rodantes presentan fallas, estas frecuencias son:

- BPFO (Ball Pass Frequency of the Outer race) Frecuencia de paso de los elementos rodantes en la pista externa.
- BPFI (Ball Pass Frequency of the Inner race) Frecuencia de paso de los elementos rodantes en la pista interna.
- BSF (Ball Spin Frequency) Frecuencia de paso de los elementos rodantes que pueden ser bolas, conos o rodillos.
- FTF (Fundamental Train Frequency) Frecuencia de rotación del portaelementos, jaula o casquillo que contiene a los elementos rodantes.

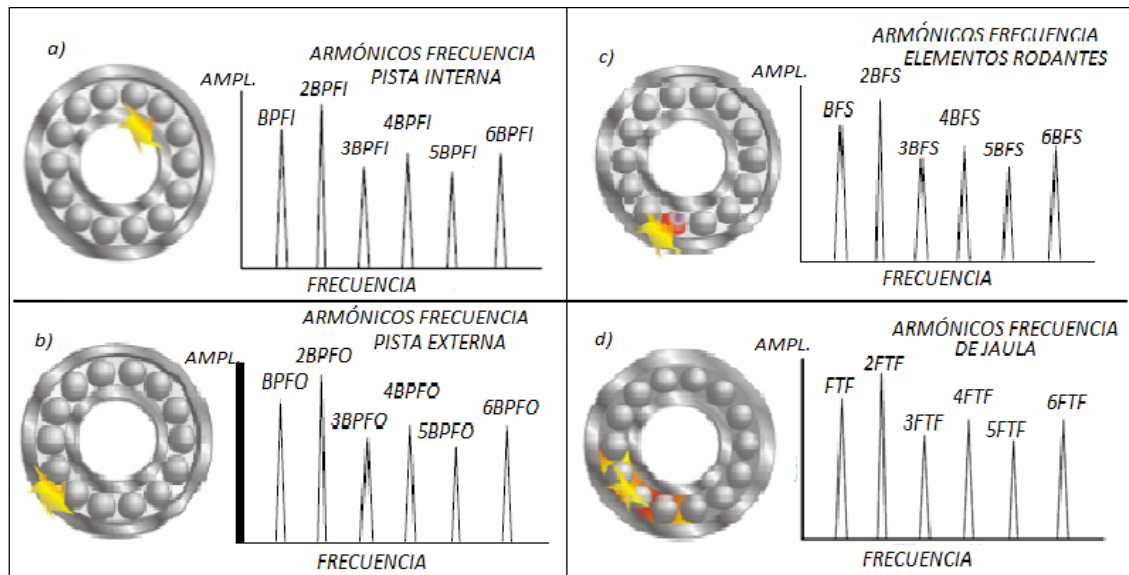
Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz (ver figura 22).

Las fallas más comunes que se presentan en los rodamientos son a causa del agrietamiento, picaduras o desastillamiento del material en alguno de sus componentes o deformación del separador o retén, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente, sobreutilización, mala manipulación, etc. Es indudable cambiar el rodamiento cuando falla, debido a que la falla seguirá incrementándose,

pero existen rodamientos de grandes dimensiones en los cuales se hace necesario investigar la parte averiada y reemplazar dicha parte. Las causas comunes por las que éstos fallan son:

- a) Falla en la pista interna
- b) Fallas en la pista externa
- c) Fallas en elementos rodantes
- d) Fallas o deterioro de la jaula

Figura 22. Fallas en los componentes de un rodamiento y su espectro característico.



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.33

2.5.8 Problemas en asientos hidrodinámicos o chumaceras. (DAZA, 2007 págs. 100-103) Los equipos industriales más importantes de nuestro país que utilizan los descansos hidrodinámicos son las turbinas hidráulicas. En general las principales fuentes de vibración en los descansos hidrodinámicos se generan por:

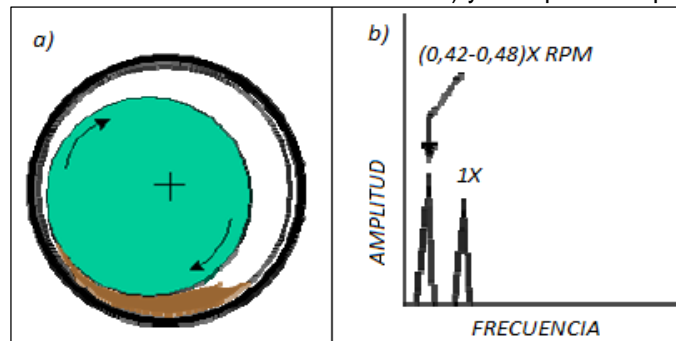
a) Inestabilidad de película de aceite. Conocido como torbellino de aceite (oil whirl), se trata de la formación de una ola de aceite que viaja alrededor del eje en el juego del descanso arrastrando al eje en su parte superior con el inminente peligro de producir un contacto metal – metal (ver figura 24a). Ocurre en chumaceras lubricadas a presión y que funcionan a velocidades relativamente altas.

Los problemas de este tipo se atribuyen al mal diseño del cojinete, desgastes excesivos de los mismos, aumento de la presión del lubricante debido al cambio de viscosidad y las vibraciones provenientes de maquinarias ubicadas en las cercanías o elementos de la misma máquina.

La corrección temporal del oil whirl se lo puede hacer modificando la temperatura del aceite, aumentando la carga del eje mediante un leve desbalanceo o desalineación o rascando los filos

del cojinete con el fin de desbastar la cuña del lubricante. Para una corrección definitiva se recomienda remplazar el cojinete por uno nuevo. El espectro característico presenta picos elevados que van desde 0,42 hasta 0,48X (ver figura 24b).

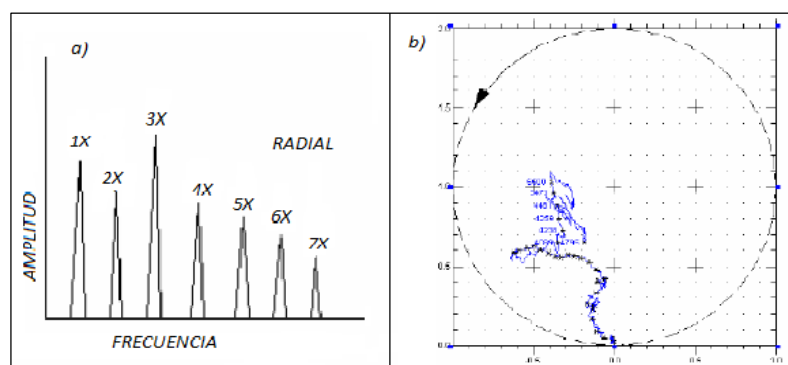
Figura 23. Problema de torbellino de aceite a) y el espectro esperado b).



Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p.103

b) Excesivo juego en el descanso. Al tener un juego incorrecto, el descanso permite que existe mucha más vibración de otras fuentes. Si el juego llega al punto de producir roce con los sellos, generará amplia vibración a $x/2$ de la velocidad de giro del eje en el sentido radial (ver figura 23a). En la figura 23b se puede notar múltiplos de la velocidad, lo cual nos haría confundir con problemas de soltura, esto se puede descartar rápidamente realizando un gráfico de la posición del eje en el descanso.

Figura 24. Espectro de un juego radial excesivo a) y diagrama de la posición del descanso b).



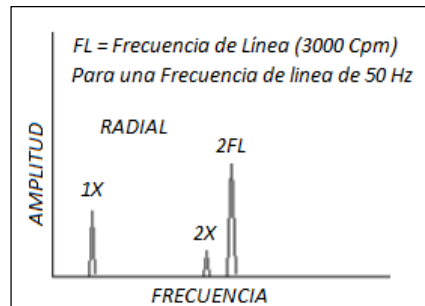
Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas.102

2.5.9 Problemas en motores eléctricos asincrónicos. (DAZA, 2007 págs. 96-99) A más de los problemas anteriormente enunciados existen algunas fallas que son “exclusivas” de algunos grupos de equipos industriales. Las fallas en motores eléctricos asincrónicos son:

a) Excentricidad estática. Se manifiesta cuando los ejes del rotor y del estator están desalineados en forma paralela. El espectro presenta múltiples bandas laterales con picos $1X$ y

2x RPS radial, un pico a 2 FL (ver figura 25), esto último no necesariamente representa un problema sino más bien es una frecuencia a la cual la atracción entre el rotor y el estator es variable y las dimensiones del hierro cambian ligeramente debido a la constricción magnética, motivo por el cual demanda de sistemas que presenten espectros con la mayor resolución.

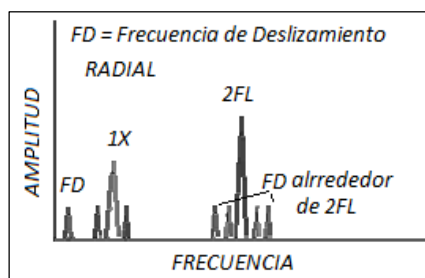
Figura 25. Espectro típico para la excentricidad estática en motores eléctricos asíncronos.



Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p.98

b) Excentricidad dinámica. En este caso, el rotor mismo no es concéntrico con su línea de centros, por lo que produce diferencias en el entrehierro entre rotor y estator. El espectro generará una componente a la 1X por el desbalanceo que genera, pero esta frecuencia estará modulada, y por ende presentará bandas laterales de dos veces la frecuencia de deslizamiento, las que también pueden estar presentes a 2x de la frecuencia de línea (ver figura 26).

Figura 26. Espectro esperado para falla por excentricidad dinámica



Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p.99

2.5.10 Problemas en turbomáquinas. Como ya se vio anteriormente en este grupo encontramos a las bombas y los ventiladores cada uno con sus diferentes tipos, pero en general las principales fuentes de vibración que aquejan estos equipos son:

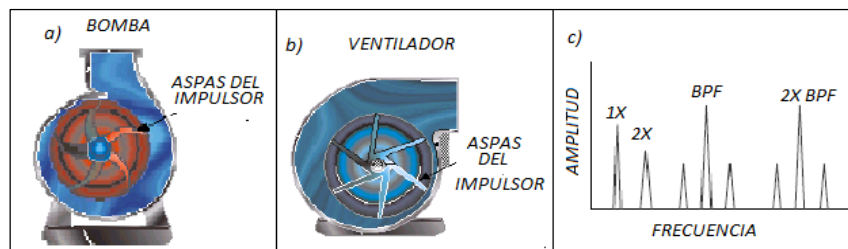
a) Frecuencia de paso de alabes o aspas (BPF). (A-MAQ S.A., 2005 págs. 31-33) La bomba (ver figura 27a) y el ventilador (ver figura 27b) se caracterizan por presentar vibraciones a frecuencias múltiplos del número de álabes. Las mismas corresponderán al número de álabes multiplicado por la velocidad de rotación del equipo. Esta aseveración es lógica ya que cada vez

que un álabe pasa frente al difusor estacionario, generará pulsaciones de presión. La BPF es excitada en sus primeros dos armónicos con abanderamientos laterales (ver figura 27c), algunas veces coincide con la frecuencia natural lo cual causa altas vibraciones.

La BPF será pequeña si se tiene un rotor correctamente balanceado, puesto que las pulsaciones tenderán a balancearse entre ellas, mientras que si se tiene la situación de que el juego entre el rotor y los difusores de la carcasa no son uniformes a lo largo de su circunferencia, estas componentes crecerán de forma importante.

En caso de aumentos en la BFP deben revisarse cambios abruptos de dirección del fluido y posibles obstrucciones parciales en la descarga de la bomba o cerca del ventilador.

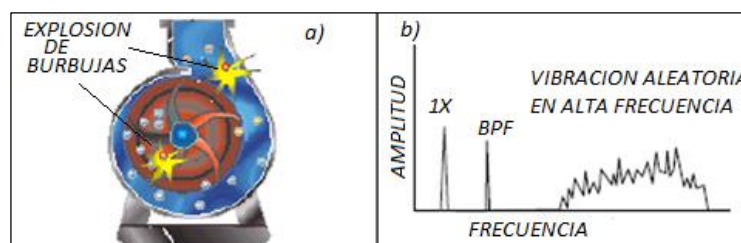
Figura 27. Problema en el fluido de líquidos a) y gases b) con su espectro característico c).



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.31

b) Cavitación. (A-MAQ S.A., 2005 pág. 32) Se genera en bombas que se encuentran operando por debajo de su capacidad de diseño o con una inadecuada presión de succión. Esto hace que las burbujas de líquido colapsen sobre sí mismas explotando (ver figura 28a), causando erosión a las paredes internas de la bomba, generando ruido, vibraciones, reduciendo el rendimiento del equipo.

Figura 28. Cavitación a) y el espectro esperado para este problema b).



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.32

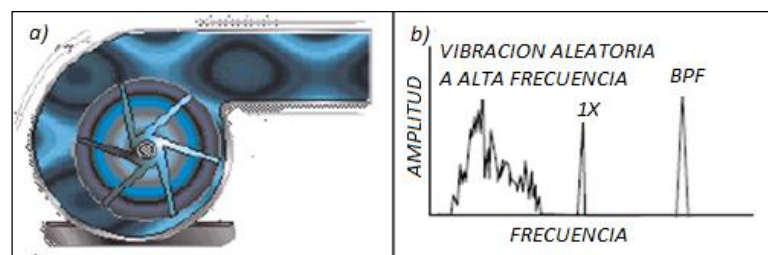
La vibración que genera este tipo de falla es aleatoria y caótica (ya que las explosiones de las burbujas no tienen patrón alguno) y a altas frecuencias, el espectro es continuo dentro de cierto rango de frecuencias, tal como se indica en la figura 28b. Una forma muy fácil de determinar la

cavitación es escuchar el ruido del fluido al pasar por la carcasa, el cual es similar al paso de arena o piedras por el interior de la bomba.

c) *Vibraciones por turbulencias de flujo.* (A-MAQ S.A., 2005 pág. 32) Este problema por lo general no es tan grave salvo que se alcance una frecuencia natural del sistema. Generalmente esta falla es provocada por un mal diseño de piping o por deformación de éstas (ver figura 29a), es común observar en ventiladores y en bombas que mueven fluidos en estado gaseoso que en ventiladores y en bombas que mueven fluidos estado líquido. La raíz de esta falla consiste en cambios bruscos en la dirección del fluido.

El espectro muestra una vibración elevada a baja frecuencia que generalmente está entre 0.3 y 30 Hz, siempre por debajo de la velocidad nominal, como se muestra en la figura 29b. Para controlar esta anomalía se debe revisar la construcción y el ensamble de los ductos. Puede ser necesaria la instalación de rejillas o cambios de área o geometría de sección.

Figura 29. Problemas por turbulencia de flujo a) y el espectro característico b)



Fuente: Tutorial vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ 2005. p.33

2.6 Normas Internacionales determinadas para el análisis vibracional.

Las normas internacionales para la evaluación de severidad vibratoria, son documentos técnicos escritos y aprobados donde se plasman los acuerdos y consensos de todas las partes interesadas en materia de calidad vibratoria. Estas normas se encargan de evaluar la severidad de la vibración, para lo cual fija niveles de alarma (advertencias que acusan las vibraciones, ya sea en magnitud o cambio significativo, el cual podrían demandar intervención) y peligro (relacionada con la integridad mecánica del equipo), dando respuesta a la pregunta ¿Cuánto es demasiada vibración para una máquina o estructura? (DAZA, 2007 pág. 104)

Existen varias asociaciones (organizaciones y grupos industriales) que en diferentes años establecieron estándares para evaluar la severidad vibratoria, en dichas normas se estipulan la posición de las mediciones así como los límites máximos permisibles por la clase de equipos como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Normativas del análisis vibracional.

Org.	Código	Año	Descripción
ISO	ISO 2372/2373	1974	Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s. La ISO 2373 constituye una adaptación especial de la ISO 2372 para motores eléctricos, y se aplica a motores de corriente alterna trifásica y a motores de corriente continua con alturas de ejes entre 80 y 400 mm.
ISO	ISO 3945	1985	Medida y evaluación de la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas, in situ con velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s.
ISO	ISO 10816	1995	Vibración mecánica.- Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas. Reemplaza a la ISO 2373 e ISO 3945.
ISO	ISO 7919	1996	Vibración mecánica de máquinas no alternativas.- Medidas en ejes rotativos y evaluación.
VDI	VDI 2056	1964	Evaluación de vibraciones mecánicas de maquinaria rotativa. Basada en la ISO 2372. Reemplazada por la ISO 10816.
ANSI	AS 2526	2003	Vibración mecánica.- Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas. Este estándar es idéntico y ha sido reproducido a partir de la ISO 10816-1:1995
IEC	IEC 34-14:1996	1996	Vibraciones mecánicas de determinadas con altura de eje igual o superior a 56mm. Medición, evaluación y límites de intensidad de vibración.
AENOR	UNE EN 60034-14:1997	1997	Vibraciones mecánicas de determinadas con altura de eje igual o superior a 56mm. Medición, evaluación y límites de intensidad de vibración. Basada en la IEC 34-14, acaba de salir la revisión del 2004, denominada por AENOR UNE EN 60034-14:2004 y correspondiente a la norma IEC 60034-14:2003.
BSI	BS 7853	1996	Vibración mecánica.- Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas. Basada en la ISO 10816-1:1995
API	API 670	1993	Monitorización en tiempo real y la protección de maquinaria crítica.

Fuente: Sinais ingeniería, Curso de análisis de vibraciones, www.sinais.es

Como se muestra en la tabla 1 existen varias normas antiguas que han sido reemplazadas y otras que se basan en normas anteriores, por lo tanto analizaremos detalladamente las más importantes y con vigencia en la actualidad.

2.6.1 *Criterios, clases y zonas de evaluación.* (DAZA, 2007 págs. 110-112) En todas las normas que se analizará existen 2 criterios, 4 clases y 4 zonas de evaluación a saber:

- Criterio de evaluación I. Magnitud alcanzada por la vibración. Orientada para cuando no se dispone de los antecedentes de la máquina en particular.

- Criterio de evaluación II. Cambio en la magnitud de la vibración. Recomendada para máquinas con historial de comportamiento vibratorio conocido.

De cara al establecimiento de la severidad de vibración admisible, las normas distinguen cuatro clases de máquinas rotativas:

- Clase I o K. Máquinas pequeñas con potencia menor a 15 kW.
- Clase II o M. Máquinas de tamaño mediano con potencia entre 15 y 75 kW o máquinas de hasta 300 kW con cimentación especial.
- Clase III o G. Máquinas grandes con potencia sobre 300 kW, montadas en soportes rígidos.
- Clase IV o T. Máquinas grandes con potencia sobre 300 kW, montadas en soporte flexible.

A demás todas las normas de evaluación de la severidad vibratoria de máquinas rotatorias, definen cuatro zonas de evaluación a saber:

- Zona A (Buena). La vibración de las máquinas nuevas puestas en servicio normalmente está dentro de esta zona, condición óptima.
- Zona B (Satisfactoria). Máquinas con vibración en esta zona se consideran aceptables para operación a largo plazo sin restricción.
- Zona C (Insatisfactoria). Máquinas dentro de esta zona se consideran insatisfactorias para operación continua a largo plazo. Generalmente la máquina puede continuar operando hasta que llegue a la detención programada para reparación.
- Zona D (Inaceptable). Los valores de vibración dentro de esta zona son consideradas de suficiente severidad para causar daño a la máquina.

Básicamente a las normas de evaluación de la severidad vibratoria se las puede dividir en dos grandes grupos, las cuales son las más ampliamente utilizadas en la industria, ya que se aplican a la mayor parte de los equipos de planta. Éstas son:

- Normas para medición en partes no rotatorias de la máquina
- Normas para medición en partes rotatorias de la máquina.

2.6.2 *Normas para medición en partes no rotatorias de la máquina.* (DAZA, 2007 págs. 112-124) En la gran mayoría de los casos la medición de las partes no rotativas se realizará en los descansos del equipo, de no ser posible en la carcasa o en algún punto que sea accesible o lo suficientemente seguro para el técnico y confiable para la adquisición de datos. Para evaluar la severidad vibratoria estas normas establecen realizar las mediciones en valores RMS y no en valores pico, puesto que el primero es más significativo debido a que toma en consideración el

historial de la vibración durante el cual se producen cambios instantáneos. Las principales normas de este tipo se detallan a continuación.

2.6.2.1 ISO 2372-1974 “*Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s. Bases para la especificación de estándares de evaluación*”. Esta norma al igual que la ISO 3945 han sido remplazadas por la norma 10816-1995, pero dado a que hay equipos que no contiene la nueva norma, tienen que seguir rigiéndose por la norma anterior. De esta manera, la norma 2372 se aplica únicamente a las máquinas del grupo I, es decir a máquinas cuya potencia nominal no supere los 15 kW y cuyo eje tenga una altura menor a 160 mm.

Para su empleo se requiere conocer el mayor valor global de la velocidad RMS en el rango de 10 a 1000 Hz, medida en los descansos de la máquina (en cualquier dirección).

Tabla 2. Rangos de evaluación de severidad vibratoria para máquinas normales (ISO 2372)

Rango de velocidad RMS (mm/s)	Clase I
Hasta 0.71	A
0.71 - 1.8	B
1.8 - 4.5	C
Más de 4.5	D

Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p. 125

Observaciones de la norma ISO 2372:

- No es aplicable a máquinas con movimientos alternativos (motores diésel, compresores alternativos, etc.), ni a máquinas que funcionen con grandes masas desbalanceadas (harneros vibratorios, centrífugas, etc.)
- No es aplicable a máquinas eléctricas de una fase (220 V) o máquinas de más de una fase, que operen en una fase.
- Se considera, además, un cambio en la condición de la máquina (por ejemplo, de buena a satisfactoria) cuando el nivel vibratorio aumenta 2,5 veces.

2.6.2.2 ISO 10816 “*Vibración mecánica – Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas*”. Recoge una serie de normas que describen los procedimientos para la evaluación de la vibración en máquinas en base a medidas realizadas en partes no rotativas de las mismas. Establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo.

Este estándar consta de cinco partes:

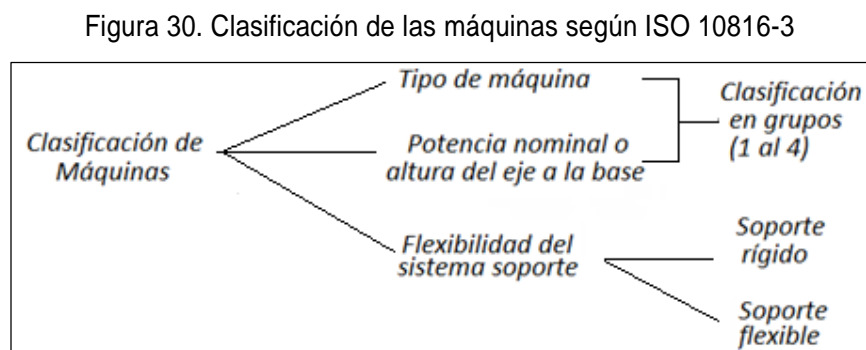
- Parte 1: Indicaciones generales.
- Parte 2: Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.
- Parte 3: Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.
- Parte 4: Conjuntos movidos por turbinas de gas, excluyen las empleadas en aeronáutica.
- Parte 5: Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo con una potencia nominal de 1 MW y velocidades entre 120 y 1800 rpm.

Cada una de las partes de esta norma proporciona un estándar individual para una serie de máquinas y define información específica y criterios aplicables únicamente a esas máquinas, la más importante es la parte tres, por lo que es menester profundizarnos en ella. En el anexo A se adjuntara esta parte de la norma en detalle.

2.6.2.3 ISO 10816-3 “Vibración mecánica – Evaluación de la vibración de máquinas en base a su medición en Partes No-Rotatorias – Parte 3: Máquinas industriales con potencia nominal sobre 15 kW y velocidades nominales entre 120 r/min y 15000 r/min cuando se mide en terreno”. Esta norma reemplaza a la ISO 2372, como su nombre mismo lo indica sirve para la evaluación de la severidad vibratoria en máquinas industriales cuya potencia sean superiores a 15 kW y hasta 50 MW, además la altura del eje debe ser superior a 160 mm; medidas en partes no rotatorias (descansos, carcasa, anclaje; etc.).

Cabe indicar que, ISO 10816-3 se aplica tanto a monitoreo continuo como a periódico y sólo para vibraciones producidas por la máquina, además no contempla las vibraciones externas que se transmiten hacia ella; a pesar de que esta norma no está orientada para el diagnóstico de la condición particular de cajas de engranajes y rodamientos, se puede aplicar para estos fines.

a) Clasificación de las máquinas según la ISO 10816-3



Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas

Esta norma contempla las siguientes máquinas:

- Turbina a vapor con potencia de hasta 50 MW.
- Turbina a vapor con potencia mayor a 50 MW y velocidades bajo 1500 rpm o sobre 3600 rpm.
- Compresores rotatorios
- Turbinas industriales a gas con potencia hasta 3 MW.
- Bombas centrífugas, de flujo axial o mixto.
- Motores eléctricos de cualquier tipo.
- Sopladores o ventiladores.
- Generadores, excepto cuando son usados en plantas de bombeo o generación de potencia hidráulica.

Máquinas excluidas por la ISO 10816-3:

- Máquinas acopladas a máquinas alternativas (ISO 10816-6)
- Compresores alternativos.
- Compresores rotatorios de desplazamiento positivo (por ejemplo de tornillo).
- Bombas recíprocas o alternativas.
- Motobombas sumergidas.
- Turbinas de viento.

b) Clasificación por grupos según ISO 10816-3:

- Grupo 1. Máquinas rotatorias grandes con potencia nominal sobre 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje $H \geq 315$ mm.
- Grupo 2. Máquinas rotatorias medianas con potencia nominal entre 15 y 300 kW, inclusive. Máquinas eléctricas con altura de eje entre 160 y 315 mm.
- Grupo 3. Bombas con impulsor multipaletas y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) o con potencia sobre 15 kW.
- Grupo 4. Bombas con impulsor multipaletas y con motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia sobre 15 kW.
- Grupo 5. Equipos que no estén incluidos dentro de la ISO 10816-3 y si lo estén dentro de ISO 2372.

La altura de eje es la distancia medida entre la línea de centro del eje y el plano basal de la máquina misma. Para máquinas sin patas, máquinas con pies levantados o cualquier máquina vertical en el mismo marco básico o cuando el soporte es desconocido, la mitad del diámetro de la máquina puede ser considerada como altura de eje.

c) Clasificación por flexibilidad del sistema soporte.

- Soporte rígido. Los soportes se dicen que son rígidos si la frecuencia fundamental de la máquina sobre los mismos en la dirección de la medición es mayor que la principal frecuencia de excitación por lo menos en un 25%.
- Soporte flexible. Se dice que los soportes son flexibles si la frecuencia fundamental de la máquina sobre dichos soportes es menor que la principal frecuencia de excitación.

Nota: los soportes pueden ser rígidos en una dirección y flexibles en otra.

d) Criterio de evaluación I “Evaluación de la magnitud de la vibración - Valores límites entre las zonas de evaluación”. Este criterio es el que debe de utilizarse cuando no se dispone de información del comportamiento vibratorio histórico de los equipos a evaluar, por ejemplo, instalaciones nuevas o que estén incorporando esta técnica de análisis a sus plantas. Una vez que se han establecido los valores típicos de vibración, se recomienda utilizar el criterio II de la presente norma.

Los valores límites para zonas de evaluación, se encuentran dados en las tablas 3 y 4. Para usar éstas tablas, debe considerarse el valor más alto medido en las direcciones radiales y la vibración axial de cualquier descanso de la máquina.

Tabla 3. Rangos de velocidad vibratoria para diferentes clases de máquinas con velocidad de rotación sobre 600 cpm. ISO 10816-3.

Velocidad RMS mm/s	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5					
	Tipo de soporte		Tipo de soporte		Tipo de soporte		Tipo de soporte							
	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible						
0,18 - 0,28	A	A	A	A	A	A	A	A	A					
0,28 - 0,45														
0,45 - 0,71			B				B							
0,71 - 1,4														
1,4 - 1,8														
1,8 - 2,3	B	A	C	B	B	A	C	B	C					
2,3 - 2,8														
2,8 - 3,5			C				C							
3,5 - 4,5	C	B				B		C						
4,5 - 7,1		D	C	C		D	C	D						
7,1 - 11,0	D			C					C					
Sobre 11,0														

Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas.

Tabla 4. Rangos de severidad vibratoria complementaria a la tabla 3 con velocidad de rotación bajo 600 cpm. ISO 10816-3

Desplaza- miento RMS um	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4			
	Tipo de soporte		Tipo de soporte		Tipo de soporte		Tipo de soporte			
	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible		
Bajo 11	A	A	A	A	A	A	A	A		
11,0 - 18,0							B			
18,9 - 22,0										
22,0 - 28,0										
29,0 -36,0	B	A	B	A	B	A	C	B		
36,0 - 45,0										
45,0 - 56,0										
56,0 -71,0										
71,0 - 90,0	C	B	C	B	C	B	D	C		
90,0 - 113,0	D	C	D	C	D	D	D	D		
113,0 - 140,0										
Sobre 140				D					D	D

Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas.

e) *Criterio de evaluación II "Evaluación del cambio en la magnitud de la vibración".* Este criterio es el ideal para cuando se dispone de información de los equipos de planta, de la forma de vibrar característica y de los valores que alcanzan normalmente por lo que se adapta la norma a la realidad específica de la planta a analizar.

Se establece como criterio de alarma cuando el cambio en el nivel de la vibración es, al menos el 25 % del límite de la zona B/C, independiente que estos cambios sean crecientes o decrecientes. El 25% del valor es proporcionado como recomendación para un cambio significativo en la magnitud de vibración. Sin embargo, pueden usarse otros valores, basándose en la experiencia para una máquina específica. Por ejemplo máquinas que tengan un comportamiento errático durante su operación.

2.6.3 Normas para medición en partes rotatorias de la máquina. (DAZA, 2007 págs. 124-126) Una máquina rotativa que tiene una carcasa relativamente rígida y/o pesada en comparación con su masa rotativa, a menudo puede llegar a considerarse como que tiene un eje rotor flexible. En tal caso, las condiciones de vibración han de ser evaluadas con un mayor grado de sensibilidad si las medidas son llevadas a cabo sobre los elementos rotativos y no sobre los componentes estáticos de la máquina.

2.6.3.1 ISO 7919 “Vibración mecánica de máquinas no alternativas – Medidas en ejes rotativos y evaluación”. Para este tipo de máquinas resulta preferible aplicar la normativa recogida en la serie de normas englobada por esta ISO 7919 antes que considerar la ISO 2372, ISO 10816-3 o la ISO 3945, puesto que éstas pueden no caracterizar adecuadamente las condiciones de funcionamiento de la máquina; aunque la realización de las medidas de acuerdo con lo establecido en estas tres normas sí pueden resultar útiles.

Tiene por objetivos, determinar cambios en el comportamiento vibratorio de la máquina y monitorear los juegos radiales a través del seguimiento de la señal DC del sensor de desplazamiento sin contacto.

a) Partes de la norma ISO 7919. Consta de 5 partes las cuales son directrices para:

- Parte 1. Procedimientos generales para varias clases de máquinas.
- Parte 2. Turbinas terrestres de vapor y generadores con potencia superior a 50 MW con las velocidades normales de operaciones de 1500 rpm, 1800 rpm, 3000 rpm y 3600 rpm.
- Parte 3. Máquinas industriales acopladas con rodamiento de fluido.
- Parte 4. Turbina de gas industrial con salidas de potencia superior a 3 MW.
- Parte 5. La máquina pone en el poder hidráulico plantas generadoras y de bombeo con potencias superiores a 1 MW.

b) Campo de aplicación de la ISO 7919. Esta norma comprende:

- Generadores.
- Turbocompresores.
- Turbina a vapor.
- Cajas de engranajes.

c) Cantidades medidas por la ISO 7919. Para la aplicación de estas normas, se mide y analiza sólo la vibración relativa del eje, dejando fuera la vibración absoluta de la máquina. Entonces las cantidades medidas serían:

- Desplazamiento medio o valor DC.
- Desplazamiento peak to peak (dpp) en la dirección de la medición.
- Desplazamiento máximo del eje (dmáx, o Smáx).

Para aplicación de la norma, se considerará siempre como dmáx, el máximo valor de dpp, medidos en los planos transversales. Se recomienda realizar una medición especial para determinar el run out total, este no proviene de las vibraciones de la máquina en sí misma, sino que se debe tanto a problemas mecánicos del eje como a problemas eléctricos. API 670

establece que este run out, no exceda de un 25% del desplazamiento vibratorio admisible o 6 μm , cualquiera que sea mayor.

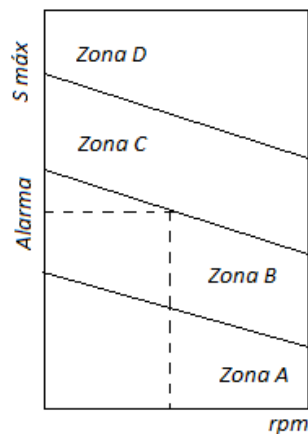
d) Criterio de evaluación I “Magnitud de la Vibración”. Los valores límites establecidos por estas normas, están dados en función de la velocidad de rotación, tal como muestra la tabla 5 y el gráfico bilogarítmico

Tabla 5. Límites de zonas de evaluación para la norma ISO 7919-3

Zona de evaluación	ISO 7919-3	Condición del equipo
Límite A/B $S_{\max A}$ (μm)	$4800 / \sqrt{n}$	Buen funcionamiento vibratorio
Límite B/C $S_{\max B}$ (μm)	$9000 / \sqrt{n}$	Límite para activar alarma
Límite C/D $S_{\max C}$ (μm)	$13200 / \sqrt{n}$	Límite de Trip (parada)

Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p.125

Figura 31. Esquema general de límites de zona para la norma ISO 7919-3



Fuente: Apuntes del curso de vibraciones mecánicas. p.126

e) Criterio de evaluación II “Cambios en la magnitud de las vibraciones ISO 7919-3”. Esta norma establece que la variación en la magnitud de la vibración no debiera ser mayor al 25% del valor límite de la zona B/C para una situación de alarma, incluso si no se ha alcanzado la zona C, considerada en el criterio de evaluación I.

f) Alcances a ISO 7919-3. En ambos casos de criterios debe verificarse que el valor entregado por la curva límite C, no exceda los juegos radiales de los descansos y los sellos. Ambos estándares establecen que alcanzados los niveles de trip (peligro), es imperativo que la máquina sea detenida. Mientras tanto, alcanzado el nivel de alarma, ya sea, por criterio I o II, las normas establecen que es posible mantener la operación del equipo; sólo bajo estricta vigilancia del comportamiento del conjunto, mientras se toman medidas de corrección y, por períodos de operación breves.

La parte 3 de esta norma se encuentra en detalle en el anexo B.

2.6.3.2 *ISO 10817-1. “Sistemas de medida de vibración en ejes rotativos, Parte 1: Señal relativa y absoluta de la vibración radial de ejes rotativos”.* En el caso de motores eléctricos y generadores, las normas de la ISO, la ANSI, la NEMA y la API establecer una serie de criterios de clasificación para los niveles de vibración admisibles en motores eléctricos.

En cualquier caso, en cada norma se especifica las condiciones de ensayo y el procedimiento a seguir, incluido el montaje para el soporte de la máquina, la instrumentación y el método de ensayo. Estos sistemas de clasificación no son iguales en todos los casos. Algunos están basados en el desplazamiento en vibración del eje pico a pico, mientras que otros utilizan bien el valor RMS o el valor pico de la amplitud de vibración en velocidad medida sobre la estructura (sobre los alojamientos de los cojinetes o los soportes), como es el caso de esta norma.

2.7 Software LabVIEW.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un revolucionario ambiente de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos. LabVIEW da la flexibilidad de un poderoso ambiente de programación sin la complejidad de los ambientes tradicionales.

LabVIEW permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactivo basado en software. Permite diseñar especificando su sistema funcional, su diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería. LabVIEW es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación.

Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes). Además LabVIEW trabaja con más de 1000 librerías de instrumentos de cientos de fabricantes.

2.7.1 *Entorno de LabVIEW. (National Instrument, 2012)* LabVIEW es una herramienta de programación gráfica. Originalmente este programa estaba orientado a aplicaciones de control de instrumentos electrónicos usadas en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo que se conoce como instrumentación virtual.

Por este motivo los programas creados en LabVIEW se guardarán en ficheros llamados VI y con la misma extensión, que significa instrumento virtual (virtual instruments). También relacionado

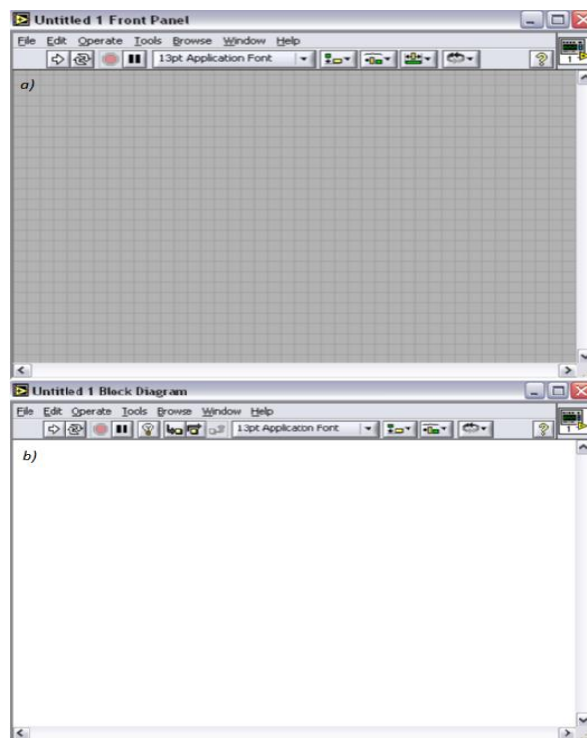
con este concepto se da nombre a sus dos ventanas principales: un instrumento real tendrá un panel frontal donde estarán sus botones, pantallas, etc. y una circuitería interna. En LabVIEW estas partes reciben el nombre de panel frontal y diagrama de bloques respectivamente.

- Panel frontal, es la parte que verá el usuario, suele tener fondo gris (ver figura 32a).
- Diagrama de bloques, es donde se realizará la programación y suele tener fondo blanco (ver figura 32b).

2.7.1.1 *Diseño de la interfaz de usuario a partir de su código.* En el ambiente de trabajo de LabVIEW están el panel frontal y el panel de programación o diagrama de bloques. En el panel de programación se relacionan los elementos utilizados en la interfaz mediante operaciones que determinan en sí cómo funciona el programa o el sistema, exactamente es la parte donde se realizan las especificaciones funcionales.

a) *Panel frontal y diagrama de bloques.* El panel frontal y el diagrama de bloques (ver figura 32) están conectados a través de los terminales (elementos que sirven como entradas o salidas de datos). De la misma forma que un indicador luminoso de la carátula de un instrumento está representado como un diodo en la circuitería interna, en un programa en LabVIEW ese mismo indicador luminoso estará representado en el diagrama de bloques como una salida de tipo booleano sobre el que escribirá un valor.

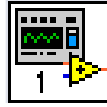
Figura 32. Presentación del panel frontal 32a) y diagrama de bloques 32b)



Fuente: Documentación National Instrument, www.ni.com/pdf/manuals

En el lateral derecho tanto del panel frontal como del diagrama de bloques aparece el icono que representa al VI (ver figura 33).

Figura 33. Representación del instrumento virtual



Fuente: Documentación National Instrument, www.ni.com/pdf/manuals








b) *Paleta de herramientas.* También existe una pequeña, pero muy necesaria paleta llamada Tools Palette. La paleta de herramientas (ver figura 34) permite crear, modificar y depurar Vis utilizando sus diferentes opciones. Si la paleta de herramientas no aparece puede activarla seleccionando en cualquiera de los dos paneles en: Windows Show Tools Palette.




Figura 34. Paleta de herramientas



Fuente: Documentación National Instrument, www.ni.com/pdf/manuals

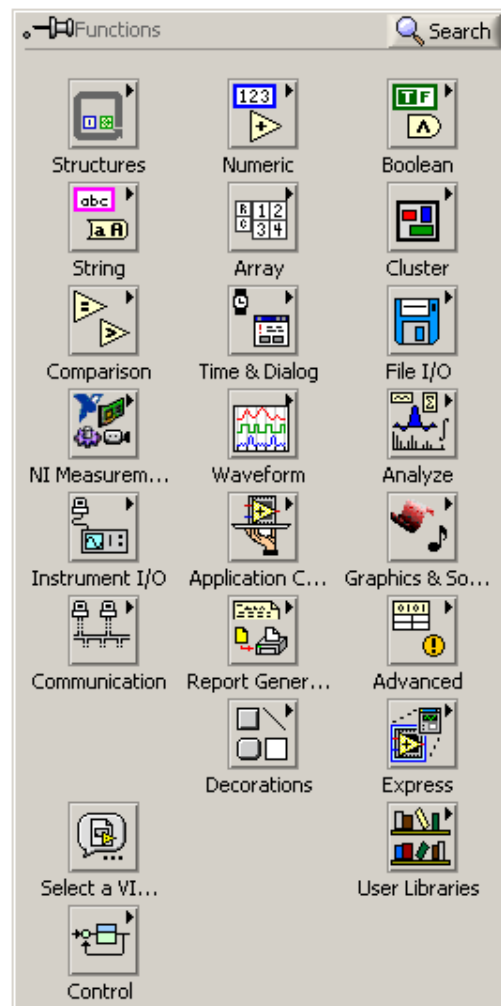
Las herramientas que contiene la paleta y las funciones que cumplen se detallan a continuación.

-  *Herramienta de operación.* Permite cambiar los valores de los elementos en el panel frontal y permite modificar textos existentes.
-  *Herramienta de posicionamiento.* Permite seleccionar, mover o redimensionar objetos.
-  *Herramienta de etiquetado.* Permite modificar etiquetas, nombres de variables y modificar y cambiar las propiedades de los textos.
-  *Herramienta de cableado.* Permite realizar las conexiones entre diferentes bloques en el diagrama.
-  *Herramienta de menú.* Permite desplegar un menú con diferentes opciones en cada uno de los objetos, esta acción se realiza también al presionar clic derecho sobre el elemento.
-  *Herramienta de deslizamiento.* Permite deslizarse a través de una ventana sin utilizar las barras de desplazamiento.
-  *Herramienta de puntos de detención.* Permite definir “puntos de parada” en una aplicación, de tal manera que la aplicación termine cuando se llegue allí.

-  *Herramienta de pruebas.* Permite colocar puntos de prueba en una aplicación. Los puntos de prueba permiten ver información de los valores calculados.
-  *Herramienta de copiado de color.* Copia colores que aparecen en la ventana activa para ser usados en otros sitios.
-  *Herramienta de color.* Permite y cambiar el color de los objetos.

c) *Paleta de funciones.* En el diagrama de bloques está la paleta de funciones (ver figura 35) que contiene todos los objetos que se emplean en la implementación del programa del VI, ya sean funciones aritméticas, de entrada/salida de señales, entrada/salida de datos a fichero, adquisición de señales, temporización de la ejecución del programa, etc.

Figura 35. Paleta de funciones



Fuente: Documentación National Instrument, www.ni.com/pdf/manuals

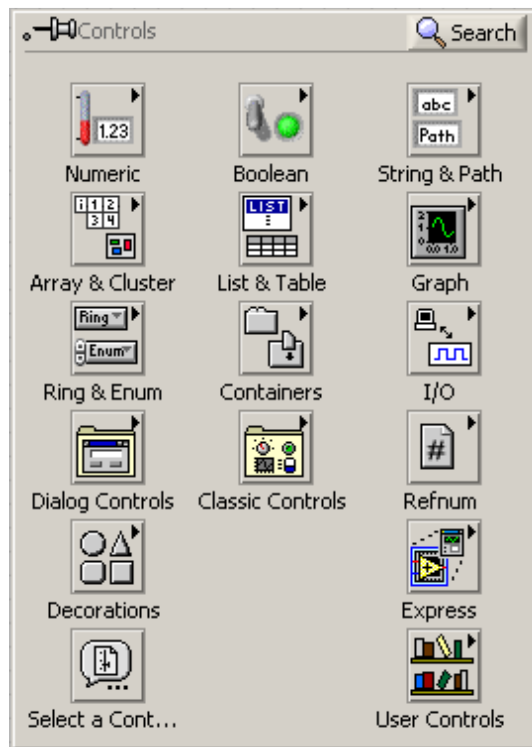
d) *Paleta de controles.* En el panel frontal está la paleta de controles (ver figura 36) que contiene los controles e indicadores que se emplearan para la interfaz del VI con el usuario. Un control es un objeto que utiliza el usuario para interactuar con el VI, introduciendo datos o

controlando el proceso. Unos ejemplos sencillos de controles son los botones, controles deslizantes, diales, cuadros de texto, etc. Un indicador es un objeto que usted coloca en su panel frontal para desplegar información (salidas). Se pueden citar como ejemplos: gráficas, termómetros, medidores analógicos y digitales, etc.

Los controles e indicadores en G (programación gráfica) son similares a las entradas y salidas, respectivamente, en lenguajes tradicionales. La mecánica de programación consta en colocar controles e indicadores en el panel frontal y alambrándolos entonces a funciones o VI's en el diagrama de bloques.

Cada vez que el programador crea un nuevo control o indicador en el panel frontal, LabVIEW crea el terminal correspondiente en el diagrama de bloques.

Figura 36. Paleta de controles



Fuente: Documentación National Instrument, www.ni.com/pdf/manuals

2.7.2 Herramientas adicionales de LabVIEW. Llamadas también Toolkits son herramientas adicionales del software con fines específicos y especializados, a continuación se detallan las más importantes.

2.7.2.1 NI LabVIEW SignalExpress. LabVIEW SignalExpress de National Instruments, es un entorno interactivo basado en la plataforma de diseño gráfico de sistemas NI LabVIEW, se

puede conectar a miles de dispositivos e interfaces de varios buses como USB, GPIB o serial, los estudiantes e investigadores pueden usarlo en los laboratorios para una variedad de aplicaciones.

Con LabVIEW SignalExpress, ahora pueden realizar análisis de manera interactiva mientras el sistema se está ejecutando y personalizar sus algoritmos rápida y fácilmente. Esta nota técnica explora algunos de estos beneficios con ejemplos de varios cursos.

a) *Detección automática de dispositivos.* NI LabVIEW SignalExpress detecta automáticamente dispositivos DAQ por USB de National Instruments e inmediatamente inicia una aplicación de registro de datos en base a la medida que se tenga que realizar. Al combinar los dispositivos NI DAQ con LabVIEW SignalExpress usted puede hacer sus medidas con unos clics con el mouse.

b) *Vista de los canales.* Para una instalación y una configuración rápida, LabVIEW SignalExpress cuenta con Channel View, que le permite ver los canales y configurarlos simultáneamente para registro. Channel View le permite configurar un registrador de datos de múltiples canales al realizar varios tipos de medida, todos con unos clics con el mouse.

c) *Vista de los datos.* Data View en LabVIEW SignalExpress es la ventana principal para presentar los datos adquiridos y los resultados de su análisis. Usted tiene la opción de personalizar Data View añadiendo gráficas, tablas, termómetros, medidores, indicadores, y LEDs. Puede crear su pantalla en el Data View cuando la aplicación se está ejecutando arrastrando los datos del paso adecuado a Data View.

2.7.2.2 *NI Sound and Vibration Assistant.* El NI Sound and Vibration Assistant optimiza el VI para sonido y vibración, ofreciendo a los ingenieros medidas interactiva e instantánea que no requieren programación. Se puede utilizar Sound y Vibration Assistant interactivo para adquirir, producir, analizar, comparar, importar, registrar y reproducir señales de sonido y vibración.

El Sound and Vibration Assistant extiende a NI LabVIEW SignalExpress la tecnología para proporcionar un análisis específico de las medidas de sonido y vibración. Se puede ampliar la funcionalidad de la Sound and Vibration Assistant con la programación gráfica en LabVIEW de las siguientes maneras:

a) Puede crear VI's con la Programación Gráfica de LabVIEW e importar estos en el Sound and Vibration Assistant para ampliar la función de las opciones de medición.

b) Puede convertir proyectos del Sound and Vibration Assistant para el diagramas de bloques de LabVIEW y así continuar el desarrollo de la aplicación en el Sistema de Desarrollo de LabVIEW. Al hacerlo, puede utilizar el herramientas interactivas en el Sound and Vibration Assistant para definir procedimientos de medición, y luego convertir la secuencia en una Diagrama de bloques de LabVIEW para crear aplicaciones de pruebas automatizadas.

2.7.2.3 NI Sound and Vibration Toolkit. Brinda la funcionalidad de procesamiento de señales para realizar medidas de audio, análisis de fracciones de octava, análisis de frecuencia, análisis transitorio y rastreo de orden. El software de análisis de NI incluye el software interactivo NI Sound and Vibration Assistant para rápidamente adquirir, analizar y registrar datos acústicos, de ruido y vibración.

Con una flexible biblioteca de medidas basadas en configuración y capacidad de análisis abierto, el Sound and Vibration Assistant está diseñado para rápida captura de datos a través de un enfoque de medidas único basado en software para crear aplicaciones personalizadas como son:

- Análisis y registro de datos autónomo basado en configuración con el Sound and Vibration Assistant.
- Procesamiento de señales de filtro de audio compatible con AES17.
- Espectro de potencia, barrido sinusoidal y análisis de octava fáciles usar.
- Nivel de sonido con evaluación A, B o C y nivel de vibración con integración.
- Medidas de audio incluyendo THD, SNR, SINAD y análisis de barrido sinusoidal.
- Soporte para E/S de archivos Universal File Format (UFF58).

2.7.3 Aplicaciones de LabVIEW. LabVIEW tiene su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, un ejemplo de esto pueden ser sistemas de monitoreo en transportación, laboratorios para clases en universidades, procesos de control industrial.

LabVIEW es muy utilizado en procesamiento digital de señales (wavelets, FFT, TDH), procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otras.

2.7.4 Métodos de ventaneo. (National Instrument, 2012) La fuga espectral es un fenómeno en el cual la energía de una frecuencia aparece desplazada hacia las otras frecuencias. En aplicaciones prácticas de señales muestreadas se puede obtener sólo un registro finito de la señal. Desafortunadamente, para los sistemas de tiempo discreto, un registro finito de muestras

resulta en una forma de onda truncada con características espectrales diferentes a las de la señal en tiempo continuo. Estas discontinuidades producen una fuga de la información espectral, el resultado es un espectro en tiempo discreto que es una versión distorsionada de la señal original en el tiempo continuo.

Una forma simple de mejorar las características espectrales de una señal muestreada es aplicar ventanas suavizadoras. Cuando se realiza un análisis espectral o de Fourier de datos de longitud finita, se pueden usar ventanas para minimizar los bordes de transición de formas de ondas truncadas, así se reduce la fuga espectral.

El ventaneo de una señal en el dominio del tiempo es equivalente a multiplicar la señal por la función ventana. La multiplicación en el dominio del tiempo es equivalente a la convolución en el dominio de la frecuencia. Es decir, el espectro de la señal ventaneada es la convolución entre el espectro de la señal original y el espectro de la ventana.

Los tipos de ventanas más utilizadas son las que se muestran en la siguiente figura.

Figura 37. Ventanas más utilizadas en la visualización de espectros

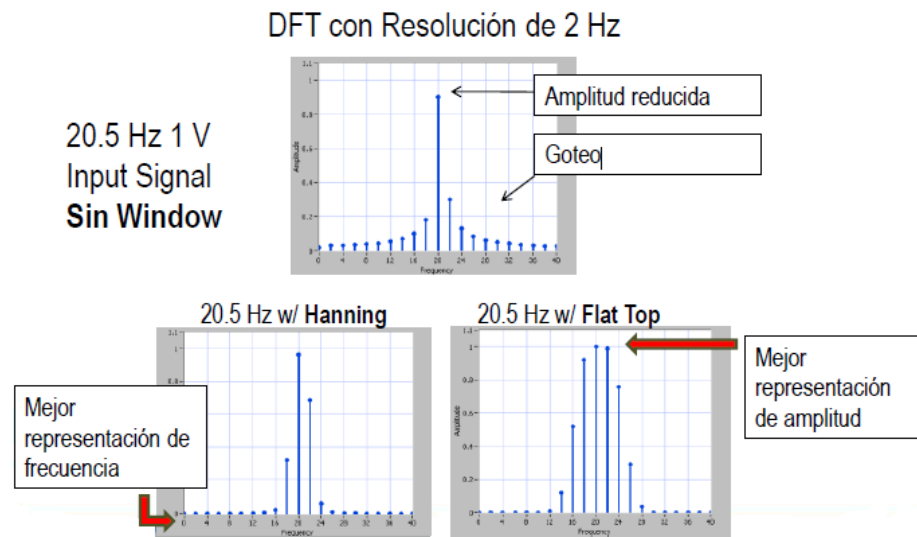


Fuente: Documentación nacional instrument, análisis frecuencia en SV y PQ 2012

Existen otros tipos de ventanas que son: Blackman-Harris, Hamming, Kaiser-Bessel, Welch, Triangle, Bohman, Parzen, Gaussian, etc. Para escoger la ventana adecuada para el sistema que se está realizando se debe tener en cuenta el siguiente criterio:

- a) Precisión en amplitud.** Capacidad de una ventana de recuperar el valor pico del contenido de frecuencia.
- b) Resolución espectral.** Capacidad de una ventana de separar tonos de frecuencia cercanos.
- c) Goteo espectral.** Capacidad de una ventana de reducir el goteo espectral sobre toda la banda del DFT.

Figura 38. Criterios de selección de windows



Fuente: Documentación National Instrument, ANÁLISIS Frecuencia en SV y PQ 2012

2.7.4.1 Ventana hanning. (MARTÍN, 2006) También conocida como ventana Hann, esta función es una de la más utilizada en procesamiento digital de señal. Las muestras de tiempo se ponderan mediante la función hanning, proporcionando una transición suave a cero en los extremos del registro de tiempo. Por tanto, el registro de muestras no producirá un transitorio cuando sea replicado por el algoritmo FFT. Aunque la forma de onda en el dominio del tiempo ha cambiado, después de aplicar la función Hanning, su contenido en frecuencia permanece prácticamente inalterado. La línea espectral asociada con la senoide se extiende una pequeña cantidad en el dominio de la frecuencia como muestra la figura 6. La ventana hanning es un compromiso entre la precisión en amplitud y la resolución en frecuencia y comparada con otras funciones de ventana, proporciona la mejor resolución en frecuencia. El coste es la reducción de la exactitud en amplitud, la ventana hanning produce líneas espectrales relativamente estrechas y es útil para analizar transitorios de duración mayor a la ventana y para aplicaciones de propósito general.

2.7.4.2 Ventana flat top. (MARTÍN, 2006) Una ventana con una banda de paso más plana reduce las diferencias en amplitud entre las muestras minimizando el error en amplitud. La ventana Flattop se considera muy precisa en amplitud, teniendo un error máximo de amplitud de 0.1 dB (1%). Como contrapartida, la resolución en frecuencia es menor que en el caso de la función Hanning. La ventana Flattop genera líneas espectrales más anchas.

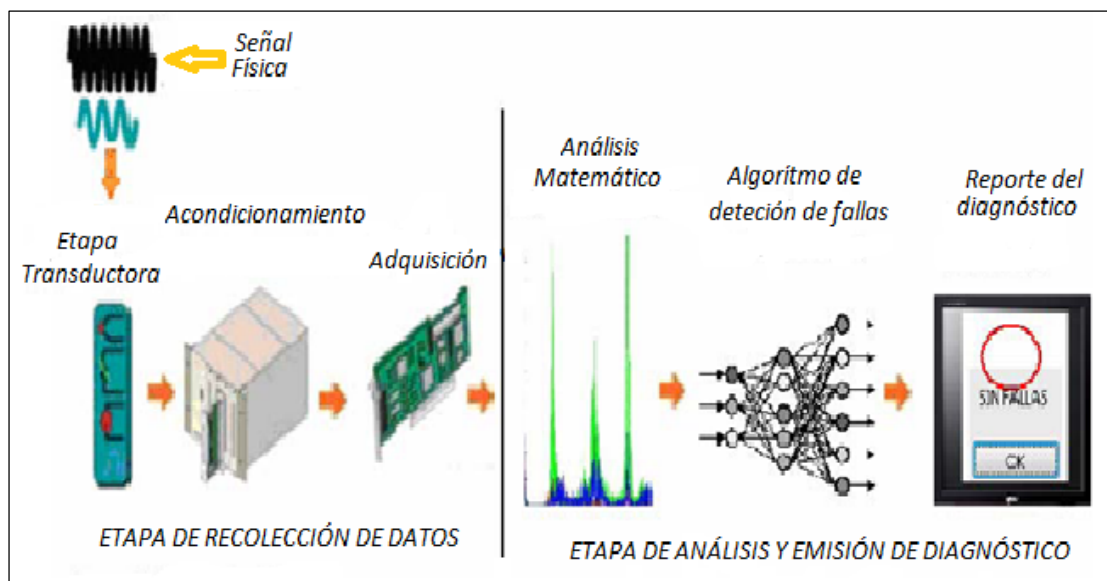
CAPÍTULO III

3. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS

Nuestro sistema virtual computarizado para el análisis vibracional sigue un procedimiento lógico desde que se tiene el fenómeno físico (vibración) en la máquina, hasta que tenemos la suficiente información para poder emitir un diagnóstico correcto sobre el estado del equipo en ese instante de funcionamiento, con esto tomamos las respectivas acciones necesarias.

Para hacer posible este procedimiento lógico nuestro sistema consta de dos etapas, la etapa de recolección de datos y la etapa de análisis y emisión del diagnóstico, cada una con sus subsistemas, como se puede observar en la figura 39.

Figura 39. Diagrama de bloque del sistema de medición y análisis para el diagnóstico del motor



Fuente: Sistema para el diagnóstico incipiente de fallas en motores de inducción. p.47

Como es lógico pensar en el mercado encontramos muchas opciones para cada etapa o subetapa de nuestro sistema, por lo que antes de escoger los componentes idóneos realizamos un análisis general de los diferentes criterios de selección, para luego revisar las opciones que nos presenta el mercado.

Debido a que nuestro propósito es desarrollar un sistema para el análisis vibracional utilizando el software LabVIEW, la tarea de selección de herramientas se reduce a la elección de los

elementos que intervienen en la etapa de recolección de datos, puesto que para la etapa de análisis y presentación del diagnóstico utilizaremos una PC, el software antes mencionado más el conocimiento y criterio técnico personal. Entonces a continuación se presenta una cierta gama de posibilidades con las que se cuenta en el mercado para la etapa de la recolección de datos.

3.1 Etapa de recolección de datos.

En la recolección, adquisición de datos o adquisición de señales, tomamos muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros sistemas electrónicos (sistema digital).

En la etapa de recolección de datos tomamos un conjunto de señales físicas, se las convierte en tensiones eléctricas y digitalizamos de manera que se pueden ser procesadas en una computadora o PC, para lo cual se requerimos de instrumentos y/o circuitos especializados en cada una de las subetapas que intervienen. Dichas subetapas se detallan a continuación:

3.1.1 Etapa transductora. Esta etapa corresponde desde que el sensor capta las vibraciones del equipo hasta que transforma la magnitud censada en una señal eléctrica con una relación de proporcionalidad. Para esto determinamos el tipo de sensor a utilizar en los puntos de medición. Los tipos de sensores que se pueden tomar como alternativas son los que a continuación se hacen mención en detalle.

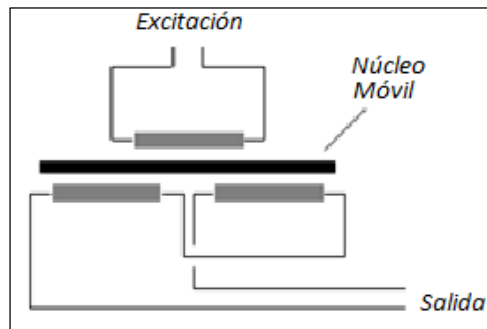
3.1.1.1 Sensores de desplazamiento. Tienen gran utilidad industrial sobre todo con el objetivo de cuantificar la expansión de la carcasa o el movimiento orbital de un eje en su cojinete de deslizamiento, su uso está limitado a máquinas lentas (< 600 CPM). Estos transductores se pueden encontrar de dos tipos como son:

a) Transductores de desplazamiento por contacto. Conocidos también como LVDT's éstos necesitan del contacto físico con la superficie vibrante, por lo que necesariamente deben ir taladrados dentro de la máquina y formando 90° con el eje de la misma.

Son usados típicamente en monitorizado continuo en máquinas de apoyos con superficies planas tales como turbinas, bombas y grandes ventiladores. Gozan de una amplia vida útil y una alta precisión debido a que su núcleo móvil no hace contacto con otros componentes que puedan absorber energía mecánica.

Su diseño comprende dos enrollados y un núcleo cilíndrico (ver figura 40).

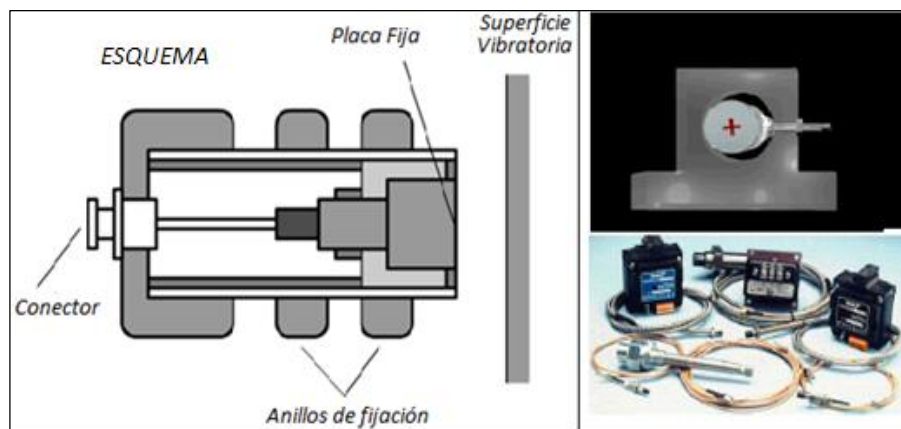
Figura 40. Esquema funcional de un LVDT



Fuente: Sistema para el diagnóstico incipiente de fallas en motores de inducción. p.49

b) *Transductores de desplazamiento sin contacto.* Son de tipo capacitivos, miden el desplazamiento relativo entre la superficie de la máquina y el transductor, aprovechando la proporcionalidad que existe entre la capacitancia y la distancia entre las placas del capacitor (ver figura 41). Al acercar el transductor (placa fija) a la superficie vibratoria, la distancia entre la placa móvil del capacitor y la superficie vibrante variará de acuerdo con los niveles de vibración. Esta variación se traduce en cambios de la capacitancia del circuito de medición lo cual posteriormente por medio de los circuitos de detección se convierte a una señal eléctrica. En este grupo también podemos encontrar a los llamados transductores o sondas de corrientes de Eddy (ver figura 41), éstos detectan el cambio generado en la distancia entre la punta del sensor y la superficie medida.

Figura 41. Transductor capacitivo (Brüel & Kjar MM004).



Fuente: Sistema para el diagnóstico incipiente de fallas en motores de inducción. p.49

Ventajas de los transductores de desplazamiento:

- Brindan excelentes respuestas a baja frecuencia (hasta 0 Hz),
- Miden el desplazamiento relativo entre el eje y el apoyo,
- Son fiables si han sido bien montados.

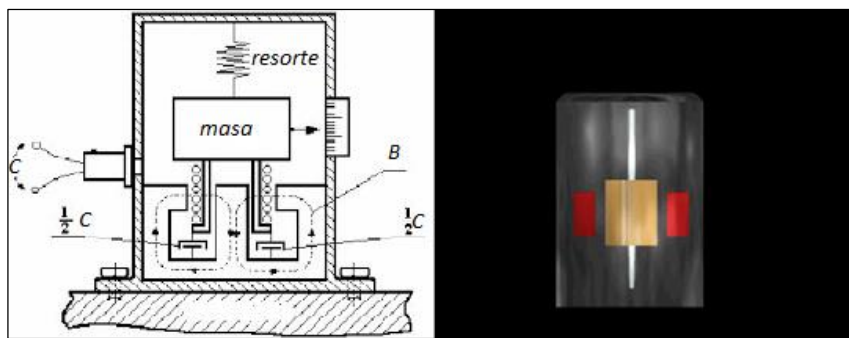
Desventajas de los transductores de desplazamiento

- Son caros y difíciles de instalar,
- Su uso se limita a bajas frecuencias,
- El desgaste del eje y los defectos en su superficie producen señales falsas, etc.

Las unidades son mm. o micras Pico-Pico.

3.1.1.2 Sensores de velocidad. El sensor de velocidad electrodinámico básicamente es un imán suspendido, montado entre un muelle y un amortiguador (ver figura 42). Una bobina abraza al imán. Cuando la carcasa del sensor vibra, el imán se mantiene estacionario debido a la inercia. Por lo tanto, hay movimiento en el imán junto a la bobina, la cual genera una señal eléctrica directamente proporcional a la velocidad de la masa suspendida.

Figura 42. Esquema de un sensor de velocidad electrodinámico.



Fuente: Sistema para el diagnóstico incipiente de fallas en motores de inducción. p.51

Ventajas de los sensores de velocidad:

- No necesitan energía del exterior, pues el mismo sistema genera electricidad,
- Trabaja a altas temperaturas,
- Elevada sensibilidad aun a bajas frecuencias.
- Fuerte señal de salida con baja resistencia interna.
- Impermeable, estanco al aceite y al vacío, resistente a productos químicos agresivos (carcasa de inoxidable).

Desventajas de los sensores de velocidad:

- No son adecuados para tomar medidas ni a bajas ni a altas frecuencias,
- Si bien trabajan a altas temperaturas presentan cambios importantes en su sensibilidad,
- Son grandes y no son muy precisos,
- Tienen corta vida útil debido a que contienen partes internas móviles.

Las unidades de medida son mm/s, RMS o VdB.

3.1.1.3 Sensores de aceleración. Son dispositivos para medir aceleraciones y vibraciones, convierten la aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración.

Tabla 6. Tipos de acelerómetros

Tipo de acelerómetros	Margen de medida (gravedades)	Ancho de Banda (Hz)	Ventajas e inconveniente	Aplicaciones
Micromecánico	De 1,5 a 250	De 0,1 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> - Alta sensibilidad - Coste medio - Uso sencillo - Bajas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> - Impacto - ABS - Airbag - Automoción
Piezo-eléctricos	De 0 a 2000g	De 10 a 20000	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilidad media - Uso complejo - Baja temperatura - No funcionan en continua 	<ul style="list-style-type: none"> - Vibración - Impacto - Uso industrial
Piezo-resistivos	De 0 a 2000g	De 0 a 10000	<ul style="list-style-type: none"> - Respuesta en CC y CA - Prestaciones medias - Bajo coste 	<ul style="list-style-type: none"> - Vibración - Impacto - Automoción
Capacitivos	De 0 a 1000g	De 0 a 2000	<ul style="list-style-type: none"> - Funciona en CC - Bajo ruido - Baja potencia - Excelentes características 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso general - Uso industrial
Mecánicos	De 0 a 200g	De 0 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisión en CC - Lentos - Alto coste 	<ul style="list-style-type: none"> - Navegación inercial - Guía de misiles - Herramientas - Nivelación

Fuente: Conceptos electrónicos en la medida de la aceleración y la vibración. p.4

Existen diferentes tipos de acelerómetros (ver tabla 6), el más común en análisis de vibraciones y en si en el campo industrial es el acelerómetro piezoeléctrico con un amplificador interno. Los acelerómetros piezoeléctricos se montan externamente, generalmente sobre el alojamiento de los apoyos. Son los sensores más utilizados en análisis de vibraciones en maquinaria. Todos los colectores portátiles están provistos de un acelerómetro, aunque la mayoría de la gente integra la señal y trabaja en unidades de velocidad. La existencia del amplificador supone una limitación en las respuestas de baja frecuencia. La característica de baja frecuencia del amplificador es generalmente a 1 Hz para la mayoría de las unidades ICP disponibles.

En la figura 43 se puede apreciar que el acelerómetro piezoeléctrico consta de un cristal piezoeléctrico situado entre la masa y la base. El material piezoeléctrico produce una carga eléctrica (proporcional a la aceleración de la superficie) al deformar (comprimir y descomprimir) bajo la acción de cierta fuerza, esta señal requiere de un circuito amplificador para convertirla en un voltaje de salida al colector.

Figura 43. Esquema del acelerómetro piezoeléctrico.



Fuente: Sinais, Ingeniería de mantenimiento, www.sinais.es

Ventajas de los acelerómetros piezoeléctricos:

- Son muy fáciles de instalar temporal como permanentemente sobre la carcasa de una máquina.
- Su señal es nítida en un amplio rango de frecuencias (2 – 10 kHz) y amplitud.
- Buena tolerancia a la temperatura.
- Robustos y diseñados para una amplia gama de aplicaciones.
- Son capaces de entregar respuestas en velocidad y desplazamiento.
- Permanece estable lo que implica que su calibración se lo puede realizar al año.

Como limitaciones podemos anotar que no responden por debajo de 1Hz, y debido al amplificador interno requiere potencia externa para operar.

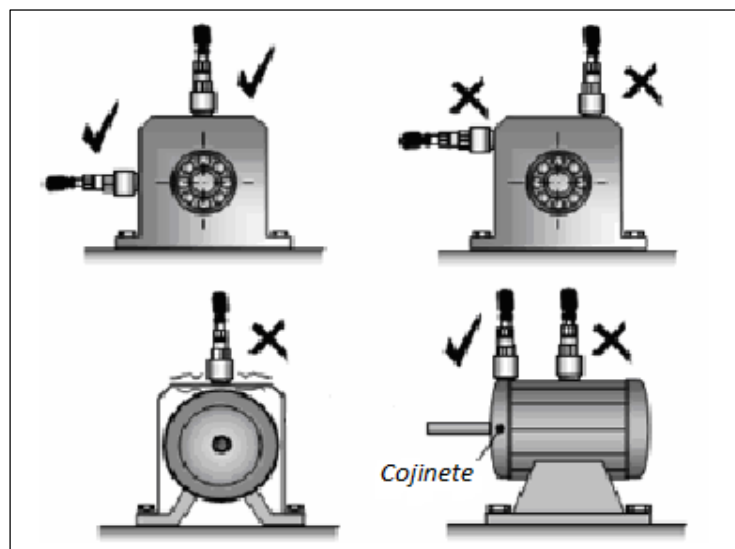
Las unidades de medida son: G, RMS o AdB.

Una vez analizado las opciones disponibles para la etapa transductora, características, composición, aplicaciones, ventajas y desventajas de los diferentes sensores podemos concluir que los acelerómetros piezoeléctricos presentan las mayores ventajas para el correcto desarrollo de nuestro proyecto. Dicho sensor comprende el primer elemento del sistema de análisis vibracional y por ende la principal fuente de error en la medición, siendo el vínculo entre el sistema y la máquina es de vital importancia esmerarnos por realizar un correcto montaje.

3.1.2 Montaje del acelerómetro piezoeléctrico. En la selección de los sensores es muy importante tomar en cuenta el método de montaje, y dado a la importancia que revisten los acelerómetros piezoeléctricos en el campo industrial y educativo analizaremos este sensor en particular.

3.1.2.1 Ubicación. Para una adecuada ubicación del sensor tomamos en cuenta que la máxima sensibilidad del acelerómetro está dada en la vibración que lo excita en su dirección axial y que la zona que mejor refleja las vibraciones de una máquina es aquella cercana a los apoyos de los elementos rotatorios o en su defecto, aquellos puntos donde el medio de transmisión de las vibraciones sea la más directa. Es decir, debemos colocar los acelerómetros lo más cerca posible a la línea de centro del cojinete (ver figura 44) para evitar recoger señales distorsionadas.

Figura 44. Ubicación correcta del acelerómetro respecto al cojinete.

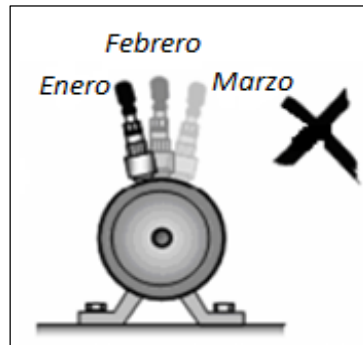


Fuente: Sistema para el diagnóstico incipiente de fallas en un motor de inducción. p.52

3.1.2.2 Fijación. Para obtener un excelente historial de medidas de vibraciones es muy importante que siempre coloquemos el sensor en la misma ubicación y el mismo acelerómetro de ser posible, con esto descartamos mediciones inconsistentes que lógicamente nos conducirá a erróneas conclusiones.

Para evitar la falta de repetitividad (ver figura 46), el acelerómetro piezoeléctrico puede ser fijado de manera temporal o permanente a la superficie de medición con auxilio de diferentes elementos de fijación tales como: el perno de acero, la cera de abeja, el imán permanente, pegamentos y el puntero, y en dependencia de estos se podrá contar con una mayor o menor aprovechamiento del rango de frecuencia del acelerómetro durante la medición.

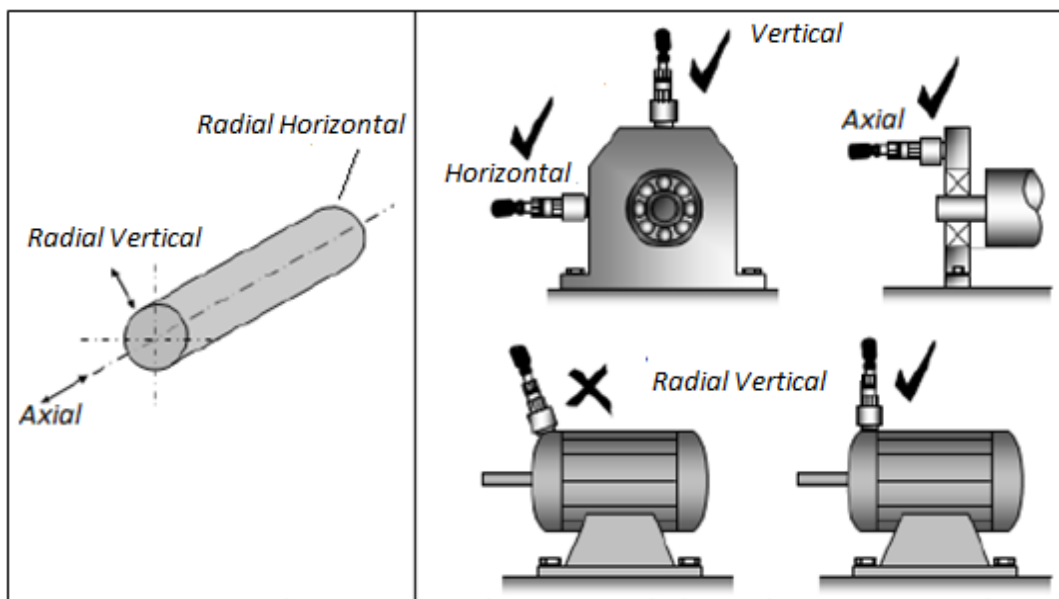
Figura 45. Falta de repetitividad en la ubicación del acelerómetro



Fuente: Sistema para el diagnóstico incipiente de fallas en un motores de inducción. p.53

3.1.2.3 Orientación. Para realizar una buena recolección de datos es importante orientar a los acelerómetros orientado en los tres sentidos como son axial, radial vertical y radial horizontal (ver figura 45), además los mismos deben estar perpendicular a la superficie y ortogonales entre sí en nuestro caso de sistema de tres canales.

Figura 46. Orientación correcta del acelerómetro para obtener mediciones



Fuente: Sistema para el diagnóstico incipiente de fallas en un motores de inducción. p.52

El método recomendado y factible es con perno de acero debido a que nuestro sensor viene incorporado con una parte roscada y además resulta ser ideal para el monitoreo continuo en maquinarias y estructuras ya que al incorporar bases roscadas para el alojamiento de los sensores evita la colocación inadecuada de los mismos durante las múltiples repeticiones, pero los equipos del banco de pruebas no tienen bases roscadas por lo que se procedió a utilizar bases magnéticas pues sus características no varían considerablemente con el anterior método mas sólo el tipo de fijación.

3.1.3 Etapa de acondicionamiento. Los CAS, son los encargados de resolver los problemas con las que llega la señal desde los sensores tales como, ruido, amplitud, potencia de la señal, la no linealidad de la misma, incluso la excitación que requieren algunos para su funcionamiento. Los CAS acondicionan o adecúan la señal a los rangos de medida de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y van ubicados a la salida de los sensores o dentro de las DAQ.

Las principales etapas de acondicionamiento de señales se detallan a continuación.

3.1.3.1 Amplificación. Es el tipo más común de acondicionamiento, pues la señal proporcionada por los transductores es de muy bajo nivel y debe ser amplificada para incrementar su resolución y reducir el ruido, para que de esta manera la señal pueda ser detectada correctamente por la DAQ.

3.1.3.2 Aislamiento. El objetivo principal de esta subetapa es el aislamiento eléctrico entre el transductor y el ordenador y protegerlo de transitorios de alta tensión que puedan dañarlo, además aseguramos que las lecturas del equipo de medición no sean afectadas a causa de distorsiones por ruido, diferencias en potenciales tierra, voltajes de modo común o lazo de tierra.

3.1.3.3 Filtrado. Este acondicionamiento realizamos con el fin de eliminar las señales indeseadas de las que se está tratando de medir, como por ejemplo las señales de ruido por la frecuencia de red.

3.1.3.4 Transformación. De acuerdo al principio de funcionamiento, los sensores proporcionan una diferencia de potencial, o una variable de intensidad como señal. Normalmente las tarjetas de adquisición de datos admiten diferencias de potencial, por lo que si el sensor proporciona una variación de intensidad, esta debe ser convertida en una diferencia de potencial proporcional para que la tarjeta pueda tratarla.

3.1.3.5 Linealización. Este acondicionamiento se encarga de realizar los cálculos respectivos (si se requiere) para convertir la señal entregada por el transductor en señal lineal, puesto que no todos los sensores tienen una variación lineal con respecto a las variaciones de la magnitud que se mide.

3.1.3.6 Multiplexación. El multiplexor es un sistema combinacional con un determinado número de entradas, denominadas canales, una salida de datos y unas entradas de selección. Este módulo o circuito se encarga de seleccionar la señal de entrada que va a ser tratada en cada momento.

En el caso de que solamente deseáramos tratar con una única señal, este circuito no sería necesario.

3.1.3.7 Excitación. Muchos sensores necesitan de una excitación, bien en corriente o bien en tensión, para producir la variación proporcional a la magnitud a medir.

3.1.4 Etapa de adquisición de datos. Este es el último paso por el que atraviesa la señal adquirida antes de llegar a la PC para ser almacenada, tratada, visualizada y analizada. Las funciones que realizan los componentes y hacen posible este paso básicamente son dos:

a) Conversión analógico/digital (ADC). Los elementos destinados a esta función lo que hacen es tomar el voltaje analógico proporcionado por los sensores, y después de cierto tiempo producen un código digital de salida que representa la entrada analógica.

b) Comunicación con la computadora. Es aquella parte de la telecomunicación que se ocupa de la transmisión de señales digitales (que ya han pasado por los transductores, acondicionadores y el hardware de adquisición de datos) entre dos dispositivos conectados por un medio de transmisión directo.

En la transmisión de datos entre el hardware de adquisición de datos y la PC pueden ocuparse diversas maneras de comunicación, entre las cuales se puede mencionar:

- *Comunicación por puerto paralelo.* Todos los bits del dato se transfieren simultáneamente. Tanto emisor como receptor se conectan mediante n circuitos idénticos, que se utilizan simultáneamente para transmitir los bits de la señal.
- *Comunicación por puerto serie.* En esta comunicación se forma un “tren” de bits, esto significa que viajan uno tras de otro desde el emisor al receptor utilizando una sola vía, si se desea transmitir datos en el sentido contrario lógicamente se debe esperar que la vía esté libre. La vía se llama conductor eléctrico bus serial.
- *Comunicación por puerto GPIB (General-Purpose Instrumentation Bus).* Este bus permite que 15 dispositivos inteligentes compartan un simple bus, la velocidad de transmisión lo determina el dispositivo más lento. La máxima velocidad está sobre el 1 Mbps.
- *Comunicación por puerto USB (Universal Serial Bus).* Se trata de una interface plug & play entre la PC y otros dispositivos. La característica más relevante de este método de transmisión está en que permite a los dispositivos trabajar a grandes velocidades, en promedio a unos 12 Mbps, esto significa unos 3 a 5 veces más rápido que un puerto paralelo y de 20 a 40 veces más rápido que un puerto serial.

Dicho todo esto la manera ideal de comunicación para nuestro trabajo es esta última. A continuación se menciona dos de los elementos que predominan a la hora de optar por un sistema de adquisición de datos.

3.1.4.1 *Los microcontroladores (PIC's).* Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de un computador, aunque de limitadas prestaciones. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna por lo que se lo suele denominar como “controlador incrustado”.

Las ventajas son el bajo costo, el bajo consumo de energía y la fácil implementación, además es una pieza clave para el desarrollo de la robótica.

La desventaja para el caso que nos ocupa que es la adquisición de datos, es que requiere de la realización de los diferentes circuitos de acondicionamiento de manera externa e individual, además la velocidad de transmisión de datos es algo lenta puesto que la mayoría de estos utilizan el puerto serial.

3.1.4.2 *Las tarjetas de adquisición de datos (DAQ's).* Una tarjeta de adquisición de datos, es un equipo que nos permite conectar un computador con el mundo externo para poder así interactuar con él realizando mediciones, análisis y control de un sinnúmero de variables análogas como son la temperatura, humedad, presión, intensidad de luz, vibración, etc. Su función principal es efectuar la transformación de la información analógica a un formato digital, lo que hace posible un posterior procesamiento y almacenamiento en una computadora.

La característica más importante de una DAQ es que para la adquisición de datos no requiere de un acondicionamiento externo puesto que vienen dotadas de un bastidor o chasis, y los respectivos softwares (drivers) de comunicación son proporcionados por los fabricantes para su correcto funcionamiento. Esta cualidad les proporciona a las DAQ's una gran ventaja sobre los PIC's.

En el mercado, independientemente que haya o no una combinación entre algunos se pueden encontrar los siguientes tipos de DAQ.

- *Tarjetas A/D.* Convierten las señales analógicas en señales digitales. Los rangos de tensión de entrada comúnmente utilizados son: 10V, - 5V y 5V, 0 a 5V, 0 a 10V, hay tarjetas A/D que miden corrientes entre 4 a 20 mA.

- *Tarjetas D/A.* Convierten una señal digital dada por la computadora en una analógica. Los rangos normales de salida de tensión que otorgan estas tarjetas son de 5V, 10V, 0 a 5V y de 0 a 10V, hay tarjetas que generan corriente de 4 a 20 mA.
- *Tarjetas I/O.* Son tarjetas de entradas y salidas digitales. Mediante estas tarjetas se pueden accionar todo lo que implique cambio entre dos estados. Por lo general se tiene un nivel bajo de 0 a 0.8 V, y un nivel alto de 2 a 5 V.
- *Tarjetas con relés.* Son tarjetas que poseen un relé de salida digital que se emplea para accionar un determinado componente del proceso. Este relé cumple con las funciones de un interruptor.
- *Tarjetas con acopladores.* Poseen circuitos optoacopladores en las entradas digitales que permiten separar la electrónica del proceso con la electrónica de la computadora. Empleado para proteger la PC de un eventual cortocircuito.
- *Tarjetas de comunicación.* Permiten comunicar la PC con el medio exterior.
- *Tarjetas inteligentes.* Estas tarjetas cuentan con un microprocesador que les permite realizar cálculos y operaciones autónomamente.

3.2 Etapa de análisis y presentación del diagnóstico

Esta es la etapa final del sistema, pues se trata del procesamiento, tratamiento, visualización, análisis y almacenamiento en un ordenador de los datos adquiridos en los procesos o etapas anteriores.

Para el correcto desarrollo de esta etapa debemos contar con un ordenador de calidad (buenas características de capacidad y velocidad) y lógicamente un eficiente programa computacional.

Todos los aspectos concernientes a esta etapa podemos desarrollar utilizando varios lenguajes de programación de propósito general como VisualBASIC, C++, Fortran, Java, Lisp, Pascal, además los lenguajes especializados de programación utilizados para la adquisición de datos como son:

- *EPICS.* Utilizado en la construcción de grandes sistemas de adquisición de datos.
- *LabVIEW.* Ofrece un entorno gráfico de programación optimizado para la adquisición de datos.
- *MATLAB.* Ofrece un entorno de adquisición y medida de datos desarrollado sobre un sistema PC compatible provisto de interfases adecuados de entrada y salida.

Estos entornos de adquisición proporcionan un lenguaje de programación además de bibliotecas y herramientas para la adquisición de datos y posterior análisis. Por esto y por adicionales características que se detallaran en un siguiente apartado el software escogido es LabVIEW, además que es con el que cuenta la universidad para realizar un lenguaje de comunicación para diferentes componentes electrónicos en diferentes aplicaciones.

3.3 Criterios de selección y requerimientos del sistema.

En el sistema de análisis computacional de vibraciones mecánicas, la etapa de adquisición de datos consta principalmente de 2 componentes, el transductor y la DAQ, mientras que en la etapa de adquisición de datos la herramienta principal es el software, además claro de los respectivos accesorios para la comunicación entre sí.

Este sistema como cualquier otro es integral, lo que quiere decir que si se quiere obtener resultados de alta calidad (fiabes y oportunos) se deben construir con componentes de las mismas características por lo que debemos ser muy cuidadosos a la hora de seleccionarlos.

A continuación se presentan los principales criterios para realizar una correcta selección de componentes para el sistema, para luego finalizar enlistando los requerimientos de nuestro sistema en particular.

3.3.1 Criterios de selección. Existen distintos tipos de transductores y tarjetas, por lo que debemos tener claro cuáles son las características necesarias que debe tener nuestro sistema para realizar las mediciones de vibración.

3.3.1.1 Criterios de selección de transductores. Las características más relevantes a tomar en cuenta en la selección de Transductores son:

a) Rango de frecuencias. Se entiende como el rango entre la menor y la mayor frecuencia de la vibración que se puede medir sin atenuarla considerablemente, pues fuera de este rango las mediciones no necesariamente representarán el fenómeno real. El límite inferior del sensor es una característica del mismo, mientras que el límite superior dependerá del valor de la frecuencia natural del sensor. El rango de frecuencias tendrá que ver con la forma en la que el sensor se monta en el equipo a medir.

b) Sensibilidad típica. Corresponde a la razón entre el voltaje de salida del sensor y la vibración que provoca esa salida, por ejemplo, si tenemos un acelerómetro que tiene una

sensibilidad de 100 mV/g, quiere decir que por cada gravedad de aceleración, el acelerómetro entrega como salida 100 mV.

c) *Rango dinámico.* Es el rango de amplitudes para el cual el sensor tiene una respuesta lineal entre la salida eléctrica y el parámetro vibratorio medido. En la práctica es la razón entre la menor y mayor amplitud que puede medir el sensor.

d) *Sensibilidad a la humedad.* Como es lógico, los acelerómetros “respirarán” mientras no estén herméticamente sellados. Durante este proceso de respiración, la humedad penetrará los sistemas, alterando el comportamiento de nuestros sensores.

e) *Sensibilidad magnética.* La interferencia de un campo magnético puede afectar el comportamiento de los transductores, cables, e instrumentos de medición, por ejemplo, la interferencia de otro sensor cercano, líneas de alta tensión, etc.

f) *Rango de temperatura admisible.* Existe una mínima y una máxima temperatura a la que un sensor puede estar expuesto sin que la temperatura ambiente afecte las capacidades de respuesta de forma significativa.

3.3.1.2 *Criterios de selección de tarjetas.* La tarjeta de adquisición de datos permite que una computadora pueda recibir y enviar datos, así como comunicarse con otros dispositivos inteligentes, por lo que cuando se escoge un modelo DAQ se debe tener en cuenta:

a) *Tipo de conector para tarjeta con la PC.* Para transferencia de datos de la tarjeta a la computadora en nuestro caso existen tres opciones PCI, PCMC, NuBUS.

b) *Resolución requerida.* Es el número de bits del CAD para cuantizar niveles. Ejemplo: Con 3 bits se tienen $2^3 = 8$ niveles, con 12 bits se tienen $2^{12} = 4.096$ niveles, con 16 bits se tienen $2^{16} = 65536$. Mayor resolución representa más precisión de la señal.

c) *Compatibilidad con otros fabricantes y otros protocolos.* Es la relación correcta que la tarjeta puede tener con elementos de otros fabricantes y de diferente proceso de elaboración.

d) *Número de canales de entrada/salida de la tarjeta.* Es la cantidad de vías de comunicación tanto con el mundo real con la ayuda de los sensores como con la PC que tiene la tarjeta.

e) *Tipos de sistemas operativos.* Pueden ser Windows, Linux, Pocker PC, Mac Os, etc.

f) *Rango de lectura en voltaje/corriente.* Es el conjunto de valores tanto de voltaje como de corriente para los que el error de la tarjeta se supone comprendido entre los límites especificados.

g) *Software de procesamiento de datos.* Capacidad de esta herramienta informática para procesar los datos obtenidos de la máquina, transformándolos en otros que puedan ser leídos fácilmente para emitir un diagnóstico.

h) *Velocidad de muestreo.* Rapidez con la que la tarjeta indica el número de muestras digitales que se toman de una señal cada segundo. Cuanta más alta sea la velocidad de muestreo, más se asemejará la forma de la onda digital a la forma de la onda analógica original.

3.3.2 *Requerimientos del sistema.* Dado que en el presente proyecto el software con el que se trabajara es LabVIEW el primer requerimiento que debemos mencionar que los componentes escogidos sean compatibles con dicho software.

Tabla 7. Requerimientos y características comparativas de los sensores para el sistema.

TRANSDUC_ REQUE_ RIMIENTOS	607 A11	608 A11	603 C01	622 B01	602 D01_8	626 B02	628 F01
Frecuencia de resonancia (25KHz)	25	22	25	30	25	12	18
Linealidad todo su rango de función	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Montaje (invasivo)	Male	2 pin	2 pin	2 pin	2 pin	Perno UNF	2 pin
Rango de frecuencia (0-10) KHz	0,5-10	0,5-10	0,5-10	0,58-6	0,5-8	0,5-2	1-4
Rango de temperatura (5-100°C)	-54 a 121	-54 a 121	-54 a 121	-54 a 121	-54 a 121	-54 a 121	-54 a 121
Resolución banda ancha (1-10)KHz	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10
Sensibilidad 100 mmV/g $\pm 10\%$	100 \pm 15	100 \pm 15	100 \pm 10	100 \pm 5	100 \pm 10	500 \pm 5	100 \pm 5

Fuente: Autores.

Esta tabla comparativa muestra las diferentes opciones que nos ofrece el mercado en cuanto a sensores con las características relevantes independientemente del costo.

Para las tarjetas igual existen diferentes alternativas, en la tabla siguiente se muestra las características mas importantes que hay que considerar para escoger una cDAQ.

Tabla 8. Requerimientos y características comparativas de las tarjetas para el sistema.

TARJETAS REQUE_ cDAQ RIMIENTOS	NI USB 6008	NI USB 6009	NI USB 6210	NI USB 6211	NI USB 9234
N° de entradas (min 3)	8	8	16	16	4
Resolución >18 bits	12	14	16	16	24
Velocidad >40Ks/s por canal	6	6	15,6	15,6	51,2
Muestreo simultaneo	NO	NO	NO	NO	SI
Sistema Operativo	Linux, Mac Os, PockerPC, Windows	Linux, Mac Os, Pocker PC, Windows	Linux, Mac Os, Pocker PC, Windows	Linux, Mac Os, Windows	Real Time Windows
Software	NI_DAQmx driver LabVIEW Signal Express	NI_DAQmx driver LabVIEW Signal Express	NI_DAQmx driver LabVIEW Signal Express	NI_DAQmx driver LabVIEW Signal Express	NI Sound and Vibration Measurement Suite, NI Sound and Vibration Toolkit
Voltaje $\pm 5V$	± 20	$\pm 10 \pm$	± 10	± 10	± 5
Bus	USB	USB	USB	USB	USB

Fuente: Autores.

El software LabVIEW es compatible con una amplia gama de instrumentos por lo que es aspecto siguiente es decidir la casa comercial que nos ofrezca la mayor cantidad de opciones, garantía y facilidad en la compra de los componentes, nuestra decisión para la compra después de la recomendación de la National Instrument (NI) ha sido los acelerómetros piezoeléctrico de la casa comercial Industrial Monitoring Instrumentation (IMI) y las tarjetas de adquisición de datos de la propia NI.

3.4 Componentes del sistema.

Figura 47. Logo del software LabVIEW de national instrument



Fuente: Software LabVIEW

Una vez analizado cada una de las opciones y recordando que la herramienta informática es el software LabVIEW (ver figura 47) la decisión de los demás componentes que formarán parte del sistema es, para el sensor el acelerómetro piezoeléctrico 603C01 y para la tarjeta la cDAQ NI 9234 por sus características semejantes a las requeridas, ambos se detallan a continuación además de los respectivos accesorios necesarios en su comunicación.

3.4.1 *Platinum low-cost industrial icp® accelerometer, modelo número 603C01.* Es un acelerómetro fabricado por la marca estadounidense IMI sensors, se trata de un sensor de propósito general, que opera por el principio de cortante o shear (ver figura 48).

Las características completas se pueden observar en la hoja de especificaciones técnicas en anexo C.

Figura 48. Platinum low-cost industrial ICP® accelerometer, modelo número 603C01.



Fuente: Autores

3.4.2 *Tarjeta de adquisición de datos cDAQ NI 9234.* La NI 9234 de National Instruments es un módulo de cuatro canales de la serie C para adquisición de señal dinámica para realizar medidas de frecuencia de audio de alta precisión desde sensores piezoeléctricos electrónicos integrados (IEPE y no IEPE) con sistemas NI CompactDAQ o CompactRIO (ver figura 49).

La NI 9234 proporciona rango dinámico de 102 dB e incorpora acondicionamiento de señales IEPE seleccionable por software para acelerómetros y micrófonos. Los cuatro canales de entrada digitalizan señales simultáneamente a rangos de hasta 51.2 kHz por canal con filtros integrados anti-aliasing que ajustan automáticamente su rango de muestreo. El detalle completo de sus características se muestra en el anexo D.

Figura 49. Tarjeta de adquisición de datos cDAQ NI 9234



Fuente: Autores.

3.4.3 Chasis NI_cDAQ-9171. El NI cDAQ-9171, es un chasis USB NI CompactDAQ de 1 ranura energizado por bus, diseñado para sistemas pequeños y portátiles de medidas de sensor (ver figura 50). Se puede combinar el NI cDAQ-9171 con cualquiera de los más de 50 módulos específicos de medidas de la serie C para crear una salida analógica, E/S digital o sistemas de medida de contador/temporizador.

El NI cDAQ-9171 tiene cuatro contadores/temporizadores integrados de 32 bits de uso general. Se puede tener acceso a estos contadores a través de un módulo digital de la serie C instalado y temporizado por hardware como el NI 9401 o NI 9402 para aplicaciones que involucran codificadores de cuadratura, PWM, conteo de eventos, generación de series de pulsos y medidas de período o de frecuencia.

El chasis cDAQ-9171 viene además dotado de:

- a)** Cable USB con un candado Thumbscrew para liberación de tensión (ver figura 51b),
- b)** El software controlador NI-DAQmx (ver figura 52), el mismo que incluye:
 - LaVIEW Signal Express LE para aplicaciones simples de registro de datos,
 - API para LabVIEW, ANSI C/C++, C# y Visual Basic.NET
 - Generación de código DAQ Assistant para NI LabVIEW, LabWindowsTM/CVI y Measurement Studio,
 - Programas de ejemplos para todos los lenguajes soportados,
 - NI Measurement & Automation Explorer (MAX) para configuración y pruebas del sistema.

En el anexo E se puede apreciar en detalle las características de este chasis.

Figura 50. Chasis NI_cDAQ-9171.



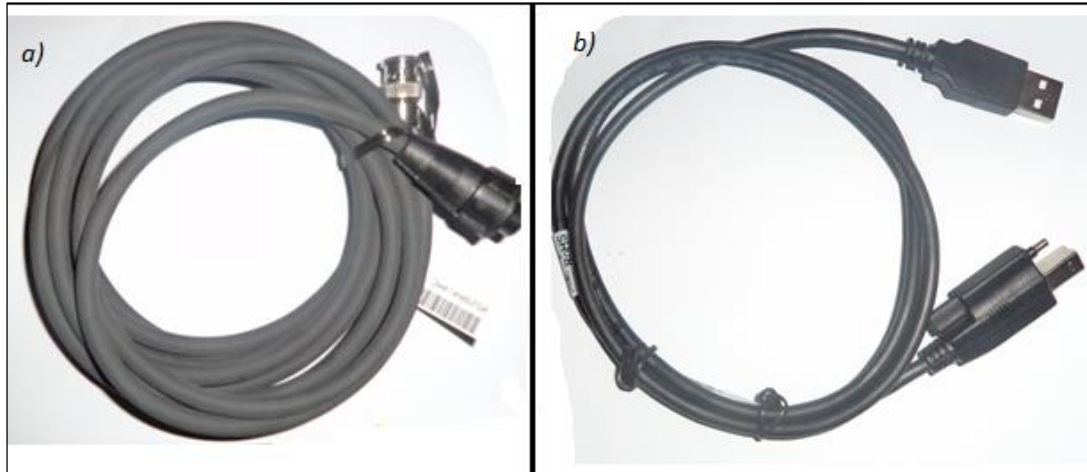
Fuente: Autores.

3.4.4 *Accesorios de conexión y/o comunicación.* Como vimos anteriormente existen diferentes cables que se pueden escoger para la comunicación además del software controlador, con los que vienen dotados nuestros elementos son:

- a)** *Cable conector sensor-tarjeta.* Es un cable coaxial con conector BNC (Bayonet Neill-Concelman) a un extremo para conectar al módulo de adquisición de datos (NI 9234) y conector MIL (Malfunction Indicator Lamp) al otro extremo para conectar al acelerómetro. Tiene 10 pies de longitud (ver figura 51a), sus demás características se encuentran detallado en el anexo F.
- b)** *Cable de transferencia de datos chasis-PC.* Es un cable USB que se conecta a un extremo con el puerto USB del computador, y por el otro lado al puerto Mini USB del Chasis. Incluye un liberador de tensión por el lado del chasis para evitar desconexiones accidentales (ver figura 51b).
- c)** *Software controlador NI-DAQmx.* El software de NI-DAQmx va más allá de un controlador básico de adquisición de datos y le brinda mayor productividad y rendimiento en el desarrollo de aplicaciones de adquisición de datos y control. NI-DAQmx controla cada aspecto de su sistema DAQ (incluyendo dispositivos de acondicionamiento de señales de NI), desde la configuración a la programación en LabVIEW, hasta el control a nivel del sistema operativo y del dispositivo.

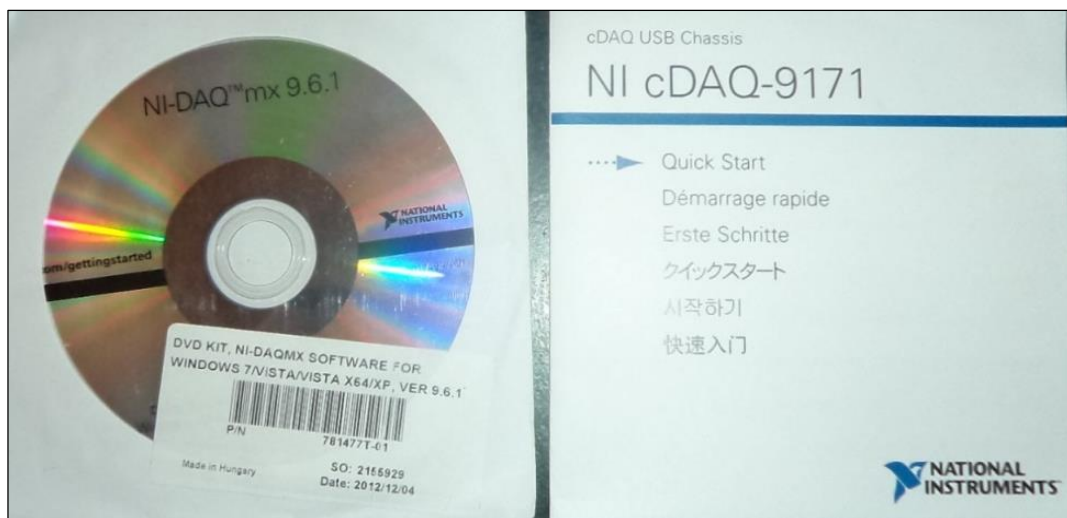
Una ventaja es que tiene soporte para Windows 2000/XP/Vista (x86 y x64) y Windows 7 (32 y 64 bits).

Figura 51. Cables de conexión: a) Cable conector sensor-tarjeta y b) Cable de transferencia de datos chasis-PC



Fuente: Los Autores

Figura 52. Software controlador NI-DAQmx.



Fuente: Autores

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO DE CIRCUITOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS MEDIANTE ANÁLISIS VIBRACIONAL.

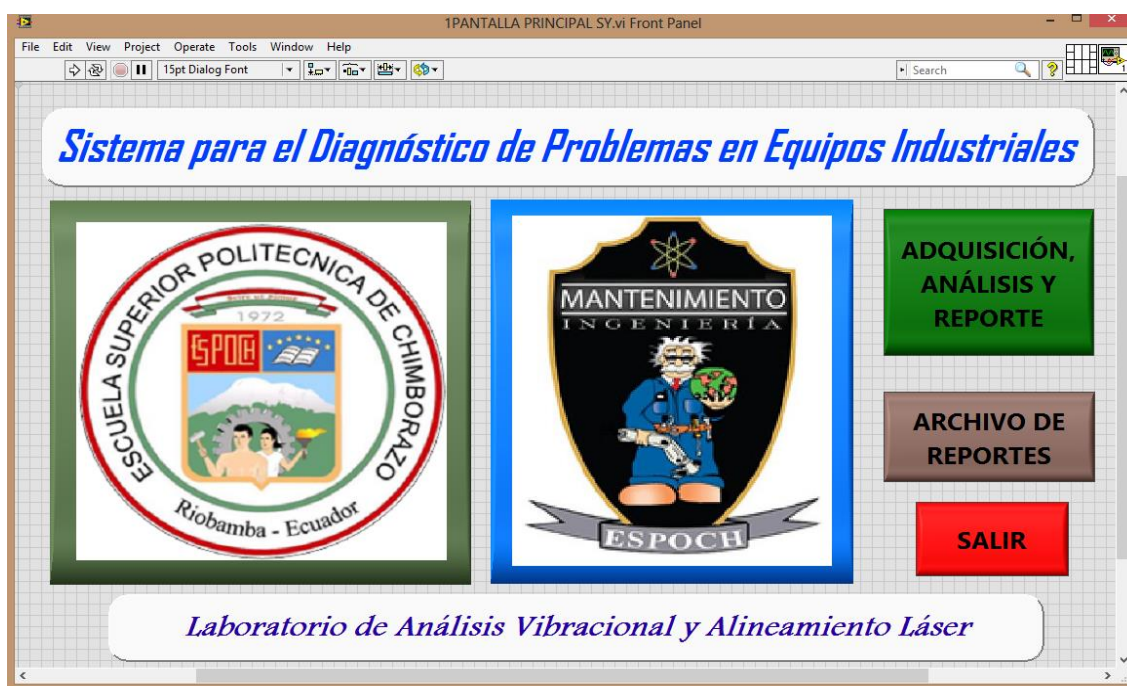
El diseño de los circuitos requeridos en nuestro sistema de diagnóstico de problemas en equipos industriales mediante análisis de vibraciones con el entorno LabVIEW necesita controles en el panel frontal y de funciones, bloques y conexiones el diagrama de bloques, los mismos que se detallan una sola vez conforme van apareciendo.

4.1 Diseño de pantallas de navegación

El sistema consta de dos pantallas interconectadas entre sí que permite la fácil navegación por cada una de ellas, las mismas que se detallan a continuación.

4.1.1 Pantalla principal. En el panel frontal (ver figura 53) consta del nombre del proyecto, sello de la universidad, sello de la escuela, el laboratorio donde se realizó las mediciones y tres botoneras, las dos primeras son ok buttons y la ultima una stop button.

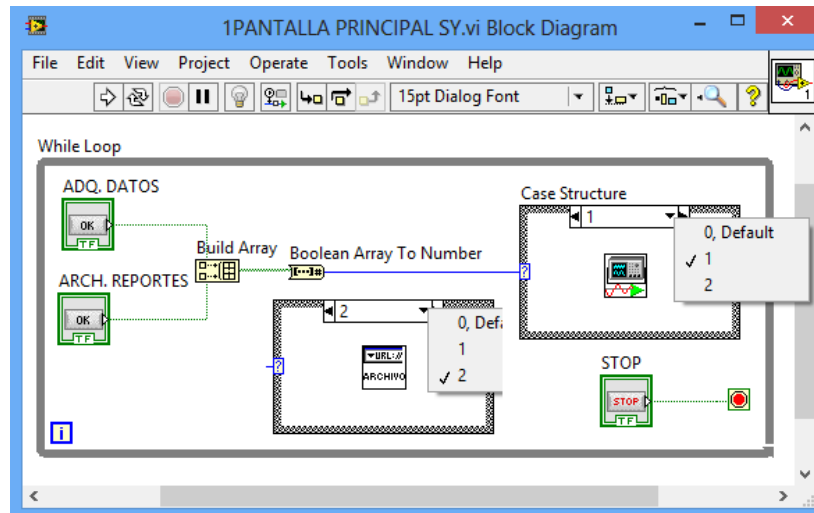
Figura 53. Panel frontal de la pantalla principal del sistema.



Fuente: Autores.

El botón “ADQUISICIÓN, ANÁLISIS Y REPORTE” nos permite ingresar en otra pantalla para realizar las funciones de su nombre y el botón “ARCHIVO DE REPORTES” permite abrir la carpeta donde se encuentran los reportes generados en anteriores mediciones, mientras que el botón “SALIR” detiene el sistema y regresa al escritorio del equipo.

Figura 54. Diagrama de bloques de la pantalla principal del sistema.



Fuente: Autores

En el diagrama de bloques se realiza las conexiones en ambos casos como se muestran en la figura 54 para lo cual se utilizó funciones que se especifican a continuación.

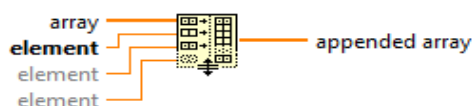
4.1.1.1 While loop. La estructura while loop es un ciclo que repite el subdiagrama de su interior hasta que la condición determinada se cumpla.

Estructura while loop



4.1.1.2 Build array. Concatena o enlaza varias matrices o elementos anexos a una matriz n-dimensional.

Bloque build array



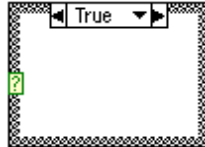
4.1.1.3 Boolean array to number function. Convierte una matriz booleana en un número entero mediante la interpretación de la matriz como la representación binaria del número.

Bloque boolean array to number function



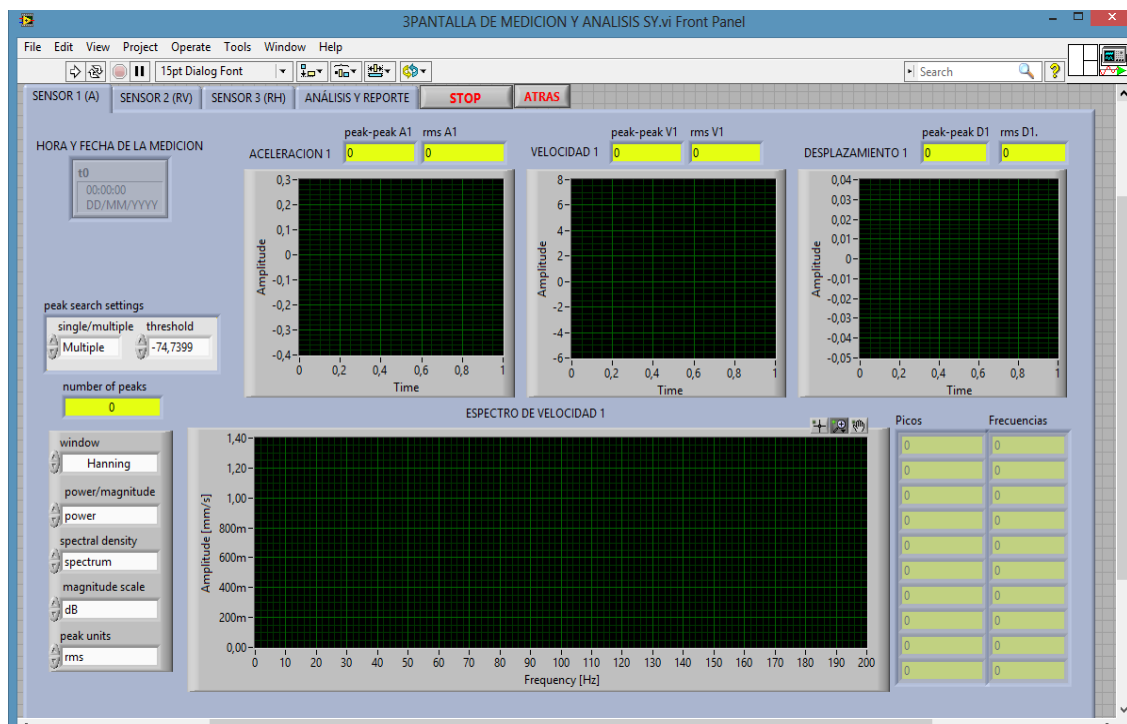
4.1.1.4 Case structure. Tiene uno o más subdiagramas o casos uno de los cuales se ejecuta cuando la estructura se ejecuta.

Lazo case structure



4.1.2 Pantalla de adquisición, presentación y reporte de datos. El panel frontal de esta pantalla contiene, cuatro pestañas, las tres primeras indican las direcciones en las que están ubicados los sensores para la toma de datos y son: axial, radial vertical y radial horizontal. Estas pestañas contienen lo mismo un indicador de la hora y fecha en que se realizó la adquisición de datos, 4 waveform graphs (gráficos de forma de onda), de éstos los tres pequeños indican en su orden de izquierda a derecha ondas de aceleración, velocidad y desplazamiento, el waveform graph de la parte inferior muestra el espectro de velocidad obtenido de la integración de la señal de adquirida por la DAQ. Además contienen indicadores numéricos (fondo amarillo) y los controles (fondo blanco) (ver figura 55).

Figura 55. Panel frontal de la pantalla de adquisición, análisis y reporte de datos.



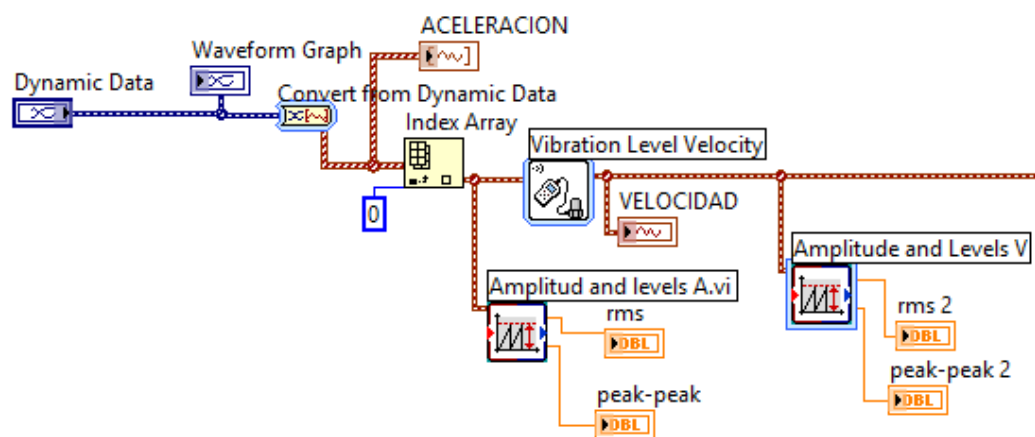
Fuente: Autores.

La figura 55 muestra la pestaña de sensor 1 conectado en sentido axial (A), la pestaña de adquisición y reporte junto con el diagrama de bloques de ésta pantalla se muestra en los siguientes ítems para una mejor explicación de lo que se realizó.

4.2 Diseño de circuitos de adquisición de datos.

Los bloques necesarios para el diseño del circuito de adquisición de datos, las funciones que cumplen dentro de la programación las modificaciones y las conexiones que se realizó para nuestro sistema se detallan a continuación.

Figura 56. Circuito de adquisición de datos.



Fuente: Autores.

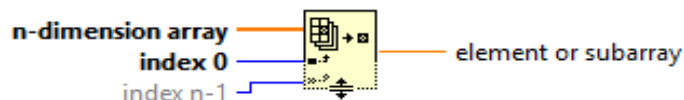
4.2.1 Convert from dynamic data. Convierte el tipo de datos dinámicos a numérico, Boolean, forma de onda, y los tipos de datos de matriz para su uso con otros VIs y funciones.

Bloque convert from dynamic data



4.2.2 Index array. Devuelve el elemento o subconjunto de n-dimensión de la matriz a un elemento índice o subarreglo.

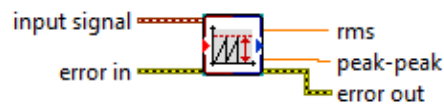
Bloque index array



4.2.3 Amplitude and levels. Es un bloque para medidas de DC, RMS, pico positivo y negativo, y los valores de pico a pico de una señal. Puede medir valores de DC y RMS con un promedio lineal o exponencial.

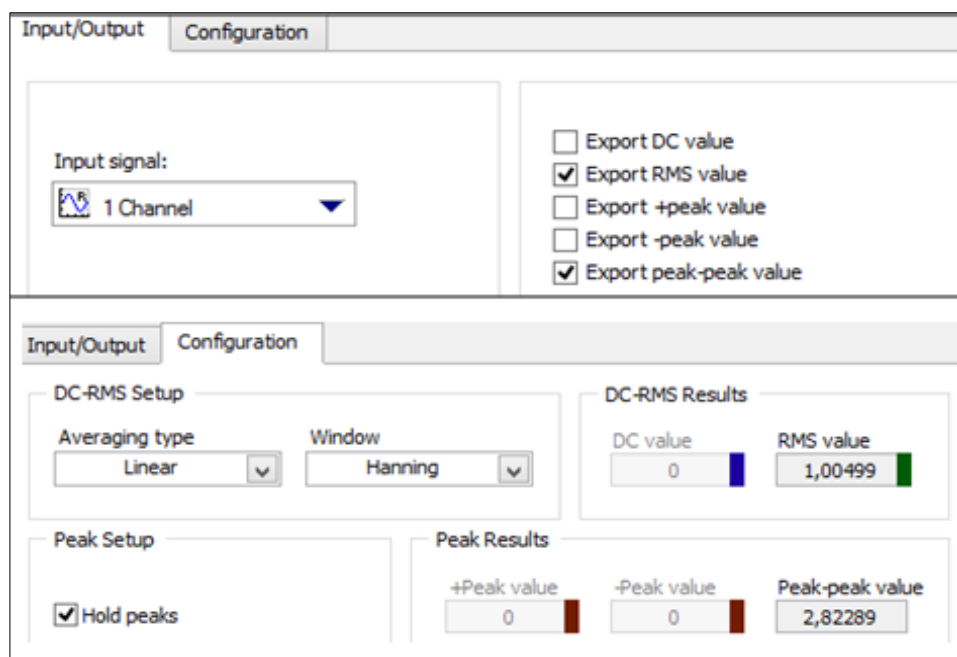
Si selecciona lineal, puede aplicar una ventana a la señal. También puede exportar individualmente a los diferentes resultados de la medición.

Bloque amplitude and levels



Este bloque ha sido configurado como se aprecia en la figura 57. Se ha escogido la ventana Hanning de acuerdo de selección explicado en el apartado 2.7.4.

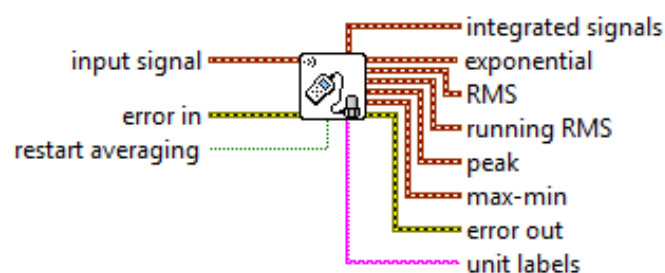
Figura 57. Configuración del bloque amplitude and levels.



Fuente: Autores.

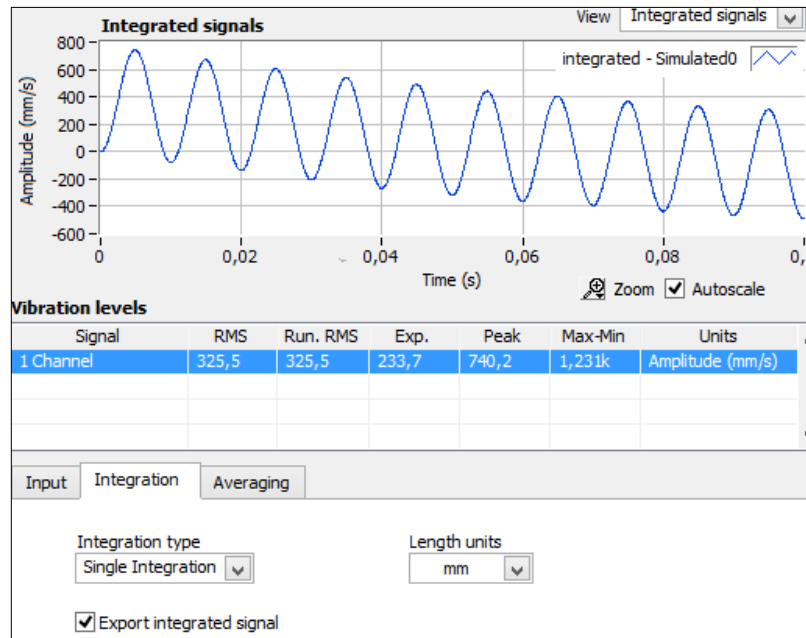
4.2.4 Vibration level. Realiza varias mediciones del nivel de vibración para un solo canal o N canales. También se puede realizar la integración simple o doble de la señal de dominio de tiempo por lo que se puede calcular la velocidad o el desplazamiento de una medición de la aceleración.

Bloque vibration level



Este bloque ha sido configurado y guardarlo en la carpeta donde se tiene guardado toda la aplicación y así invocar a este bloque cuando se ejecute el programa.

Figura 58. Configuración del bloque vibration levels.

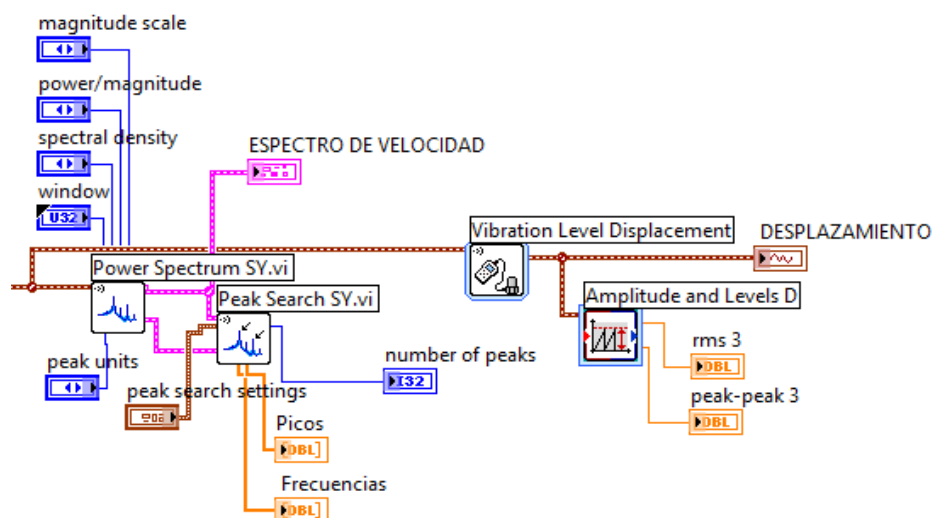


Fuente: Autores.

4.3 Diseño de circuitos de medición y presentación de los datos adquiridos.

Para la medición y presentación de los datos que se adquiere en el circuito anterior se necesita de conexiones bloques y demás elementos que se muestran y detallan a continuación.

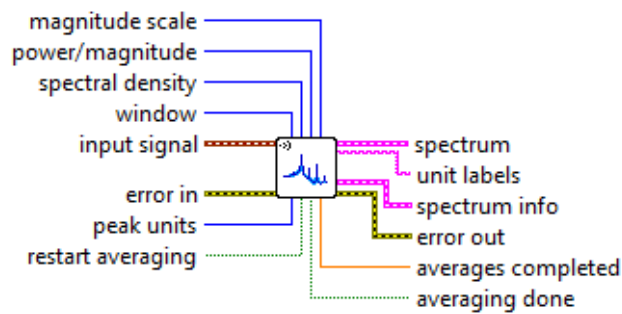
Figura 59. Circuito de medición y presentación



Fuente: Autores

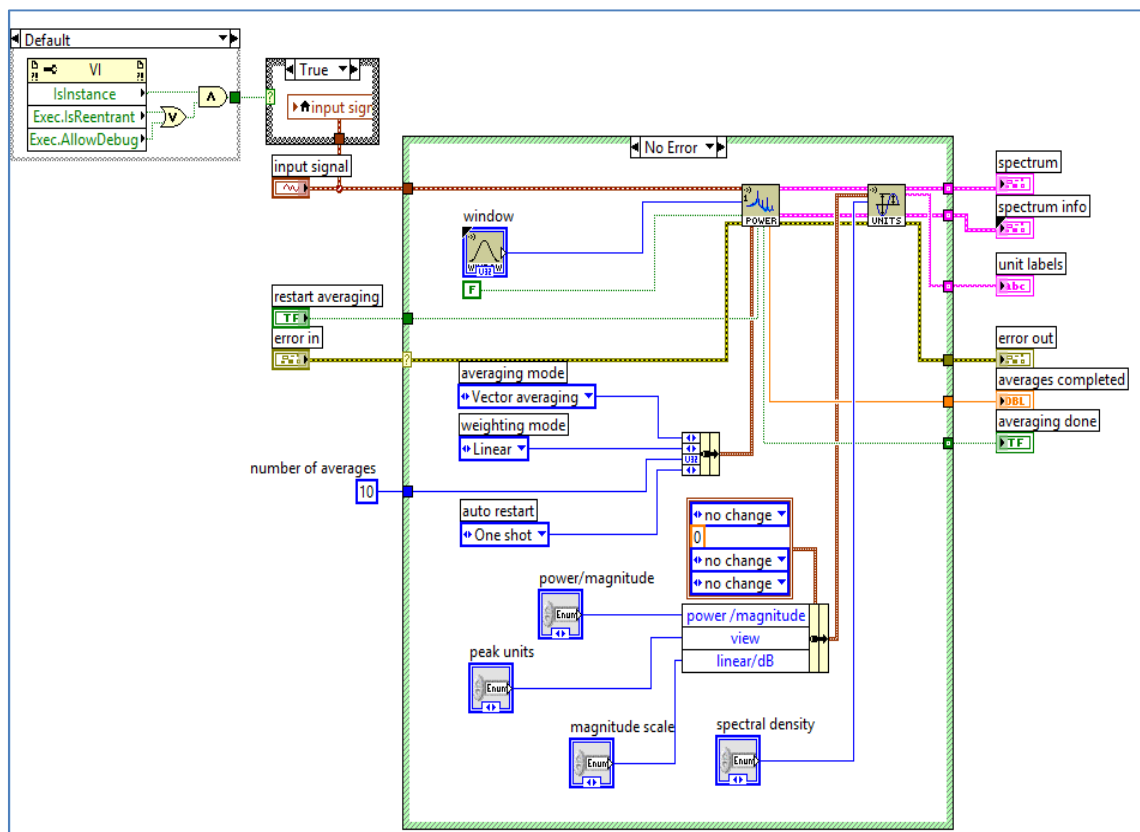
4.3.1 Power spectrum. Calcula el espectro de una magnitud promediada de la señal adquirida.

Bloque power spectrum



Este bloque ha sido modificado internamente para poder cambiar fácilmente valores como: power/magnitude, magnitude scale spectral density, window y peak units, luego de esto ha sido guardarlo en la carpeta donde se tiene guardado toda la aplicación y así invocar a este bloque en el momento de ejecutar el sistema.

Figura 60. Modificaciones del bloque power spectrum.



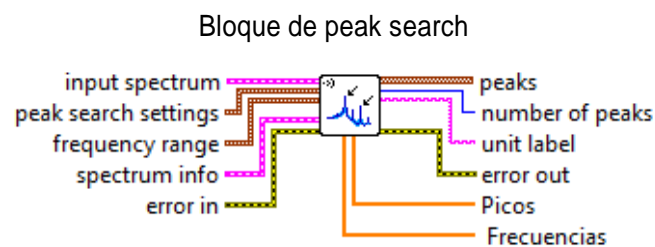
Fuente: Autores

Como podemos observar se colocó un control de texto para: window, power/magnitude, peak units, magnitude scale, spectral density y así poder controlarlo desde el panel frontal de la pantalla de adquisición de datos.

Una vez adquirido los datos se requiere mostrar que mediciones tiene y un análisis de dichos datos obtenidos. Para esto se requiere el bloque peak search

4.3.2 Peak search. Realiza una búsqueda de pico en el dominio de la frecuencia. Se puede detectar ya sea una sola o múltiples picos en un espectro de magnitud o espectro de potencia. Se puede especificar el umbral de magnitud y rango de frecuencia para ajustar la búsqueda de picos.

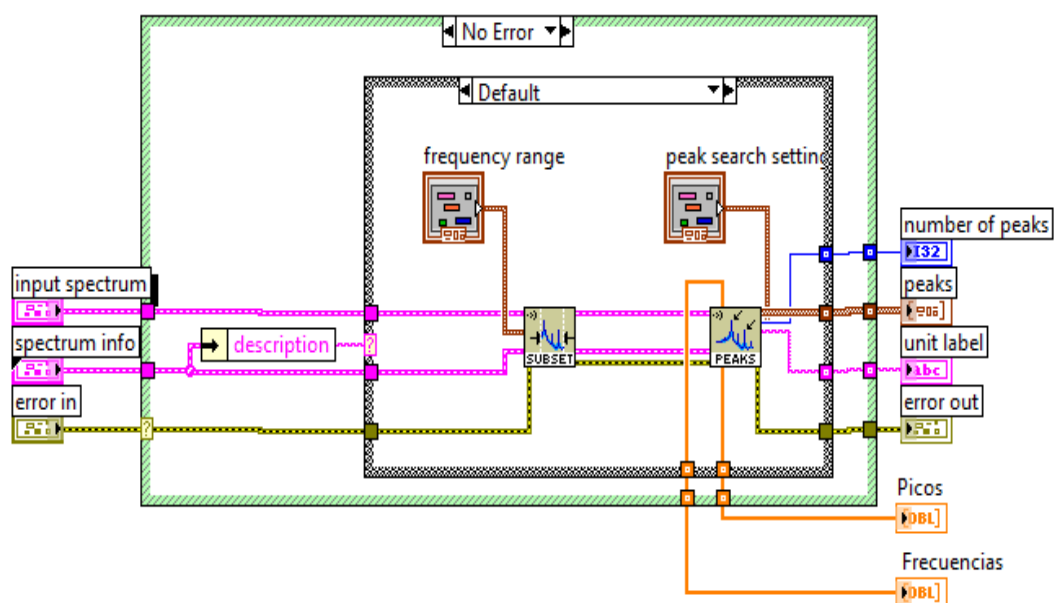
Se utiliza la señal de entrada y los parámetros de configuración específicos para buscar varios picos dentro del rango establecido.



En el interior de este bloque se encuentra un bloque llamado peak al cual se le ha agregado las salidas de los diez picos mayores (picos) con sus respectivas frecuencias (frecuencias).

Adicionalmente se ingresó dentro del bloque de peak para modificarlo internamente como se aprecia en la siguiente figura.

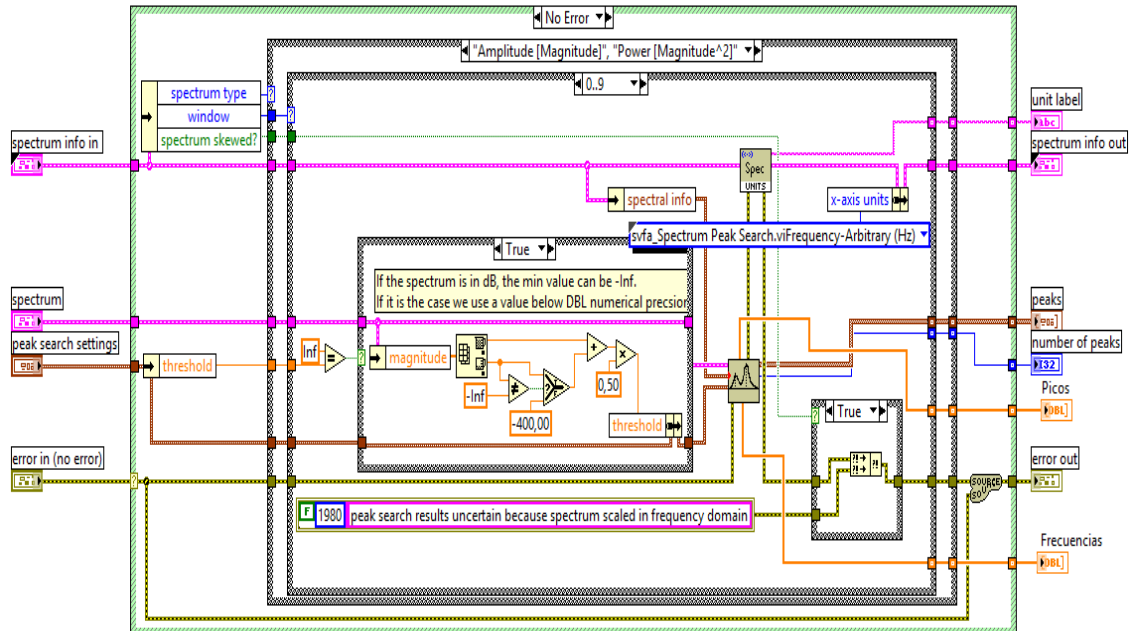
Figura 61. Modificaciones del bloque peak search



Fuente: Autores

Dentro del bloque de peak se muestra su diagrama de bloques, y se aprecia que están las salidas antes mencionadas.

Figura 62. Modificación del bloque peak



Fuente: Autores

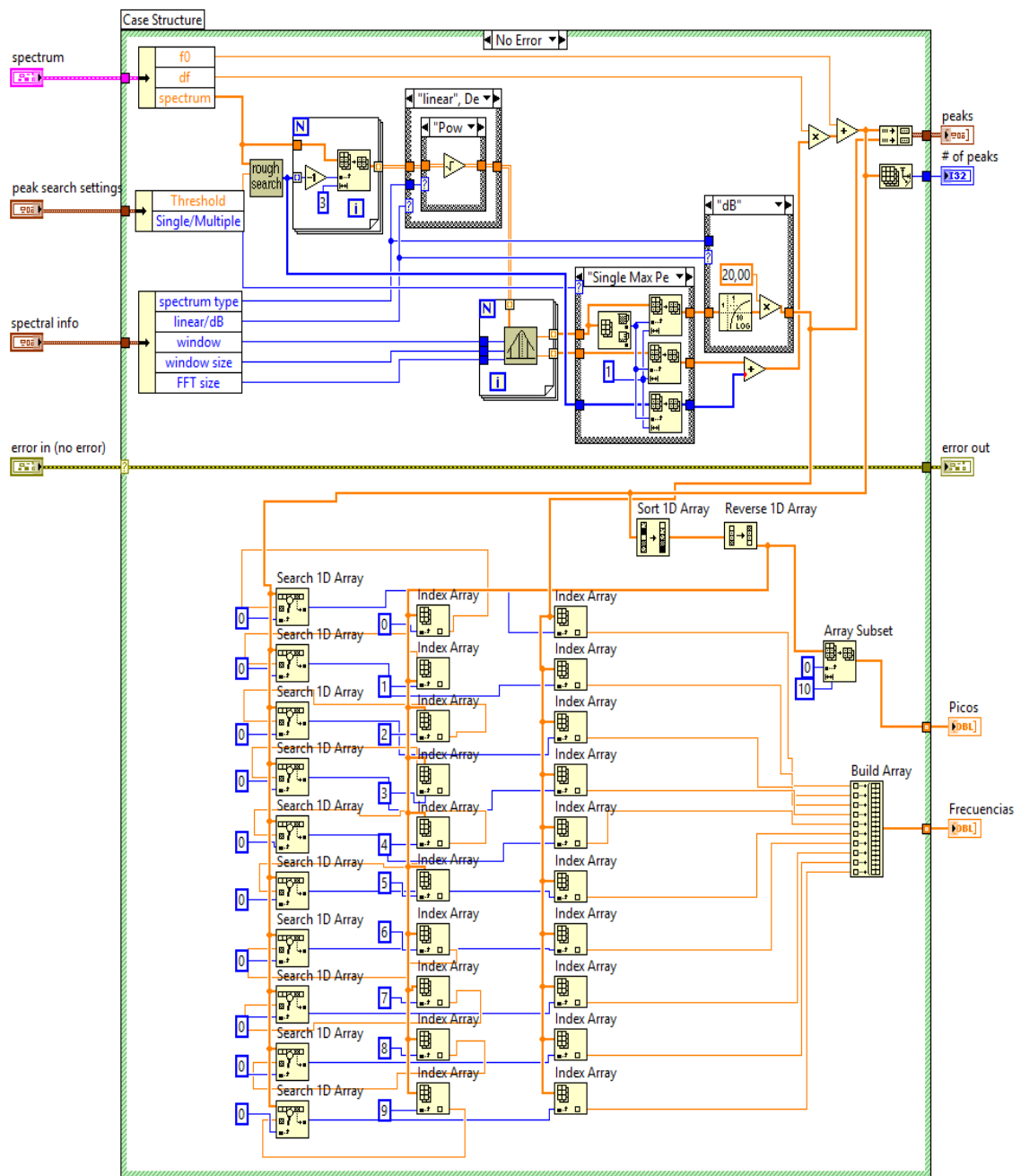
Finalmente ingresamos al bloque `spectrum_peak_search` para realizar la programación, mediante la cual determinamos las diez amplitudes más altas y sus respectivas frecuencias, se escogió los valores de amplitud y se los ordeno de menor a mayor, luego se los invierte para tenerlos ordenados mayor a menos de ahí se procede a crear un sub-arreglo de diez elementos con su salida tipo arreglo (picos).

La frecuencia de cada uno de esas amplitudes de la determinó escogiendo cada uno de los valores de amplitud de menor a mayor, después se busca esos valores en el arreglo de las amplitudes y determinamos el índice de ese elemento, después mediante este índice buscamos y escogemos la frecuencia correspondiente a las diez mayores amplitudes.

Para terminar ingresamos estos valores de frecuencias en un build array y lo ponemos en una salida tipo arreglo llamada frecuencia. Estos valores serán mostrados en las pantallas de programación.

Todo lo acotado anteriormente que se realizó en este bloque se muestra con detalle en la parte inferior de la siguiente figura.

Figura 63. Modificación del bloque spectrum_peak_search



Fuente: Autores

Para modificar el bloque Peak Search se utilizaron varios bloques que a continuación se detallan las funciones que cumplen.

4.3.3 Sort 1D array. Devuelve una versión ordenada de la matriz con los elementos dispuestos en orden ascendente.

Bloque sort 1D array



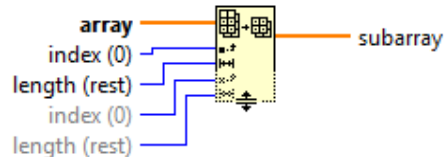
4.3.4 Reverse 1D array. Invierte el orden de los elementos en el array.

Bloque reverse 1D array



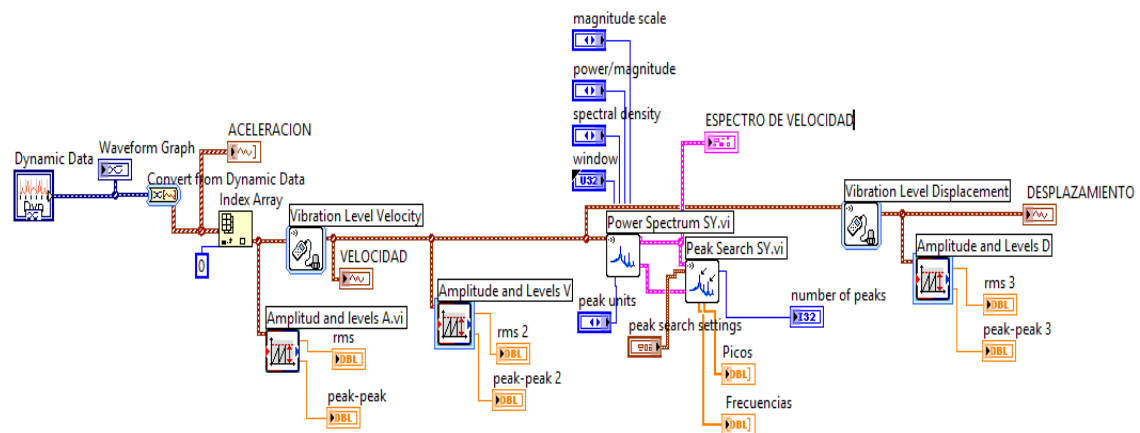
4.3.5 Array subset. Devuelve una porción del array que comienza en el índice y que contiene elementos de longitud.

Bloque array subset



Una vez realizado los circuitos de adquisición, medición y presentación de datos procedemos a juntarlos obteniendo el circuito completo para el sensor 1 como se puede apreciar en la figura 64.

Figura 64. Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición, medición y presentación de datos del sensor uno.



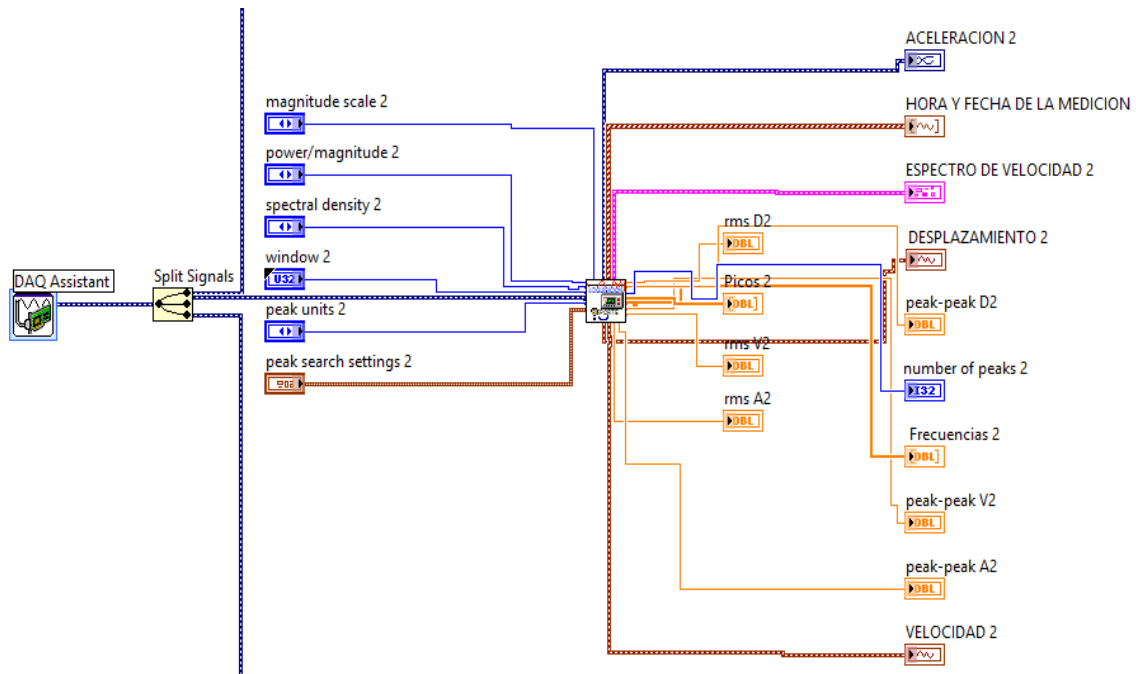
Fuente: Autores

Como el circuito de adquisición, medición y presentación de datos es el mismo para los tres acelerómetros procedemos a convertirlo en un subVI para una fácil y compacta conexión a la DAQ assistant (ver figura 65) y proteger de posibles modificaciones por error del circuito, dejando los terminales de los indicadores y controles para obtener la información necesaria en el análisis posterior de los datos y modificar las propiedades de algunos bloques respectivamente.

En la figura 65 se muestra la conexión al sensor dos, donde los controles a la izquierda y los indicadores a la derecha están conectados al subVI los cuales son mostrados en el panel

frontal. La misma conexión se realiza con los sensores 1 y 3, a continuación con la ayuda de un split signals todos son conectados a la DAQ assistant (ver figura 65).

Figura 65. Conexión de la DAQ assistant al circuito de adquisición, medición y presentación de datos del acelerómetro dos.

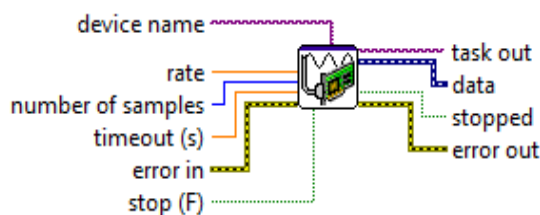


Fuente: Autores

Todo el circuito es introducido en un while loop, entonces los elementos necesarios en la conexión de este circuito son el bloque DAQ assistant que adquiere la señal, el split signals que permite conectar este bloque con el subVI de los tres sensores y el While Loop que permite la acción que contiene. Los tres elementos se detallan a continuación.

4.3.6 DAQ assistant. Crea, edita y ejecuta tareas utilizando NI-DAQmx. Mediante este bloque podemos realizar la adquisición de los datos con la tarjeta NI 9234, elegir el puerto que será utilizado (a0, a1, a2,...) así como también el tipo de muestreo.

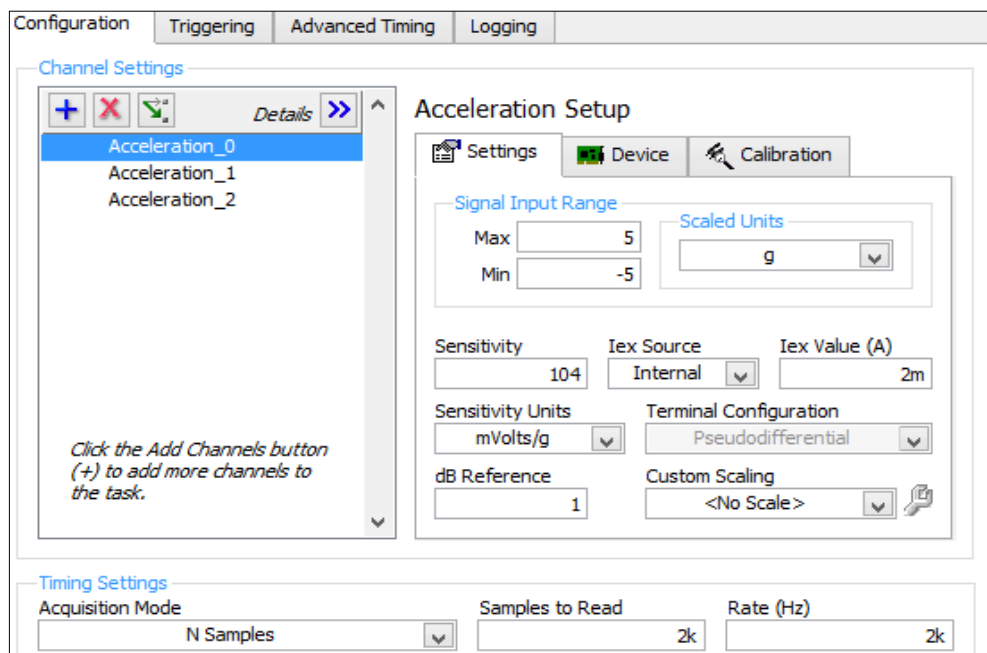
Bloque DAQ assistant



Las propiedades de este bloque han sido configuradas de acuerdo a la cantidad de sensores a utilizar, la sensibilidad de éstos, el número de muestras y la velocidad de lectura (ver figura 66).

Para poder configurar la DAQ assistant en necesario conectarla a la Pc.

Figura 66. Configuración del bloque DAQ assistant

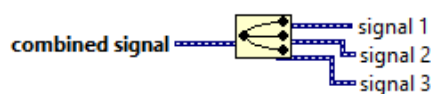


Fuente: Autores

4.3.7 Split signals. Fracciona dos o más señales provenientes de la DAQ assistant en señales de componente. Cambia el tamaño de la función para añadir salidas.

Cada unidad de la señal original contiene la información de tiempo (t_0 y dt) de la forma de onda. Cuando LabVIEW divide la señal, cada señal resultante retiene la información original.

Bloque split signals



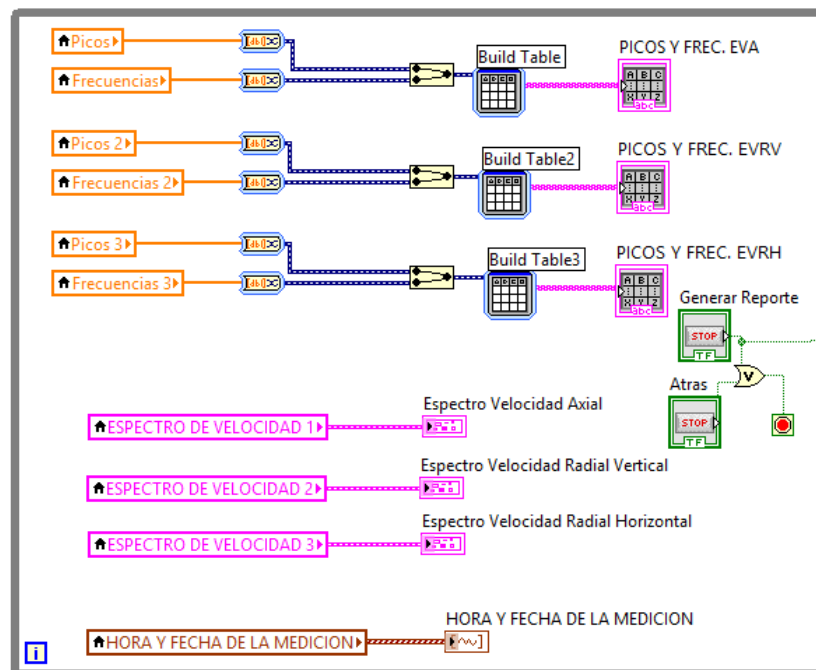
4.4 Diseño de circuito de presentación y análisis del problema.

En este apartado se detalla toda la programación inherente a la pestaña de análisis y reporte que se observa en la pantalla de adquisición, análisis y reporte.

Para facilitar la presentación y el análisis del problema los circuitos mencionados anteriormente han sido introducidos dentro de una Flat Sequence Structure que nos permite ejecutar varios subdiagramas de manera ordenada y controlada por el usuario, esto nos ayuda a detener la adquisición de datos sin paralizar el sistema completo.

Puesto que la gráfica más empleada en el análisis vibracional representa el espectro de la velocidad, primeramente procedemos a trasladar estas tres gráficas (espectros de velocidad axial, radial vertical y radial horizontal) a la ventana “Análisis y Reporte” de la pantalla “ADQUISICIÓN, ANÁLISIS Y REPORTE”, además de la hora y fecha de la toma de datos y los diez picos más altos con sus respectivas frecuencias utilizando variables locales, a las mismas que se les crea indicadores para visualizar el contenido en el panel frontal de la pantalla antes mencionada (ver figura 67).

Figura 67. Diagrama de bloques de la presentación de espectros y tablas



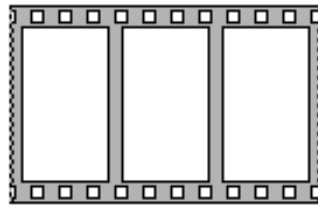
Fuente: Autores

Las variables locales no son otra cosa que una forma de trasladar datos dentro de un mismo subVI sin utilizar cableado y pueden ser de modo escritura o lectura.

Con los valores de los picos y sus frecuencias se procede a formar una tabla, para lo cual primeramente debemos transformar los datos de tipo arreglo a datos dinámicos mediante el convert to dynamic data, luego estas dos señales se convergen en un merge signals, para después ser introducido en un build table, para finalmente ser mostrados en las respectivas tablas visualizadas en el panel frontal. Los bloques utilizados en este circuito se detallan a continuación.

4.4.1 Flat sequence structure. Consiste de uno o más subdiagramas, o tramas, que se ejecutan secuencialmente. Utilice la estructura de la secuencia plana, de modo que un subdiagrama se ejecuta antes o después de otra subdiagrama.

Bloque flat sequence structure



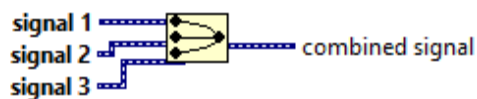
4.4.2 *Convert to dynamic data.* Convierte los datos dinámicos en datos escalares que puede ser numérico, booleano o forma de onda.

Bloque convert to dynamic data



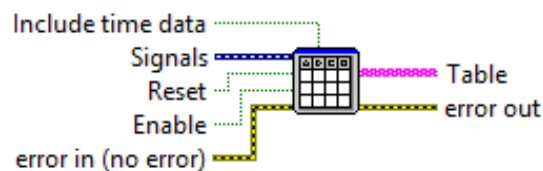
4.4.3 *Merge signals.* Combina dos o más señales en una sola salida.

Bloque merge signals



4.4.4 *Build table.* Convierte una señal o señales en una tabla de datos que muestra la amplitud de cada señal y los datos de tiempo para cada punto en la señal.

Bloque build table



4.5 Diseño del circuito para la generación de reportes

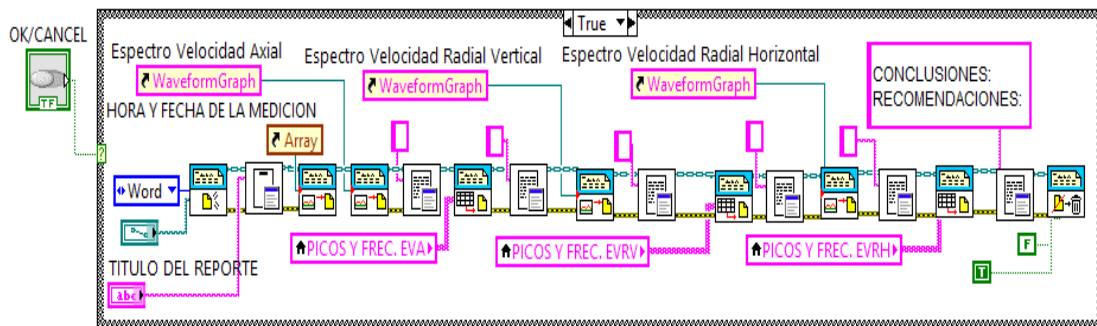
Por último tenemos la programación que hace posible la generación del reportes, como se puede ver en la figura 68, esta parte consta de un new report.vi que es el encargado de generar el reporte, se puede escoger de entre 4 tipos de reportes, en nuestro caso de elegimos de tipo word, pues es un tipo de archivo fácil de editar, además se ingresa la dirección en la que se guardara en nuevo reporte, luego tenemos un control de texto que nos permite ingresar el título del reporte a través del word easy title.vi.

Las gráficas son ingresadas al reporte mediante el append front panel Image to Report.vi a través de los respectivos VI serves referens y los datos de las tablas de picos y frecuencias ingresan al reporte mediante append tablet o report.vi a través de las respectivas variables

locales creadas en el circuito anterior. Para colocar espacios entre las figuras y las tablas nos valemos de word easy text VI.

Finalmente tenemos un dispose report.vi que nos ayuda a guardar los cambios realizados y cerrar el reporte como se puede apreciar en la figura siguiente.

Figura 68. Diagrama de bloques de la generación de reporte

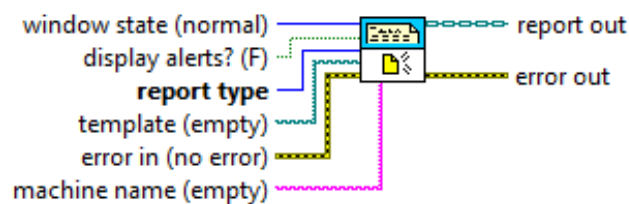


Fuente: Autores

Para mayor detalle de las funciones de cada bloque utilizado en este circuito se complementa en los siguientes ítems en el mismo orden en el que se encuentran en la figura de izquierda a derecha.

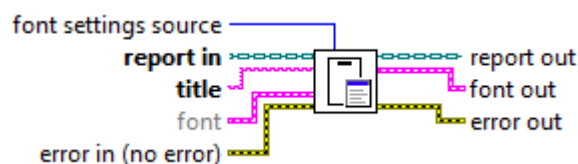
4.5.1 New report VI. Crea un nuevo informe. Puede dar formato al texto utilizando el tipo de letra, color de fondo, la alineación y los atributos de estilo de línea externa.

Bloque new report VI



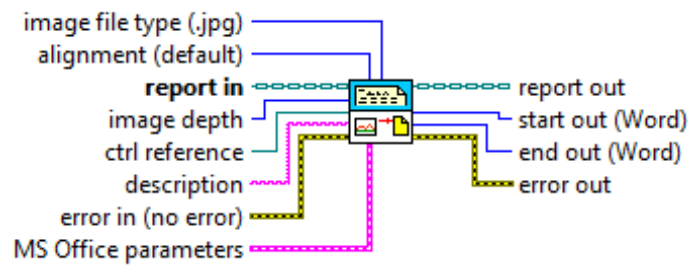
4.5.2 Word easy title VI. Añade un título a un informe de microsoft word.

Bloque word easy title VI



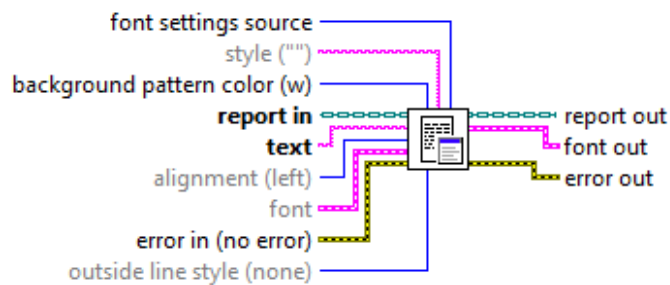
4.5.3 Append control image to report VI. Crea una imagen del objeto especificado en el panel frontal y lo anexa a un informe.

Bloque append control image to report VI



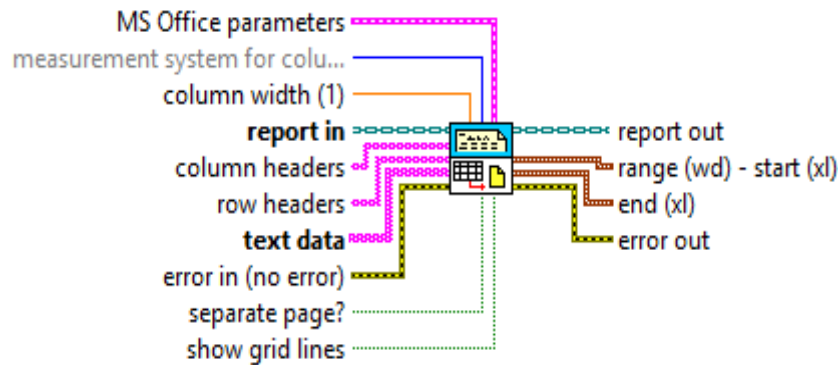
4.5.4 Word easy text VI. Añade texto a un informe de microsoft word, en nuestro caso es el encargado de dar el espacio entre figura y tabla del reporte.

Bloque word easy text VI



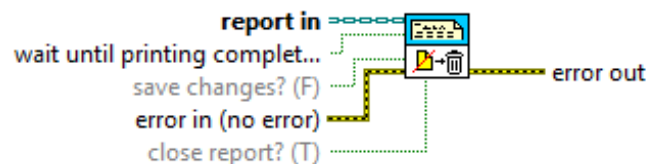
4.5.5 Append table to report VI. Añade una matriz 2D del informe como una tabla con el ancho de columna dada.

Bloque append table to report VI



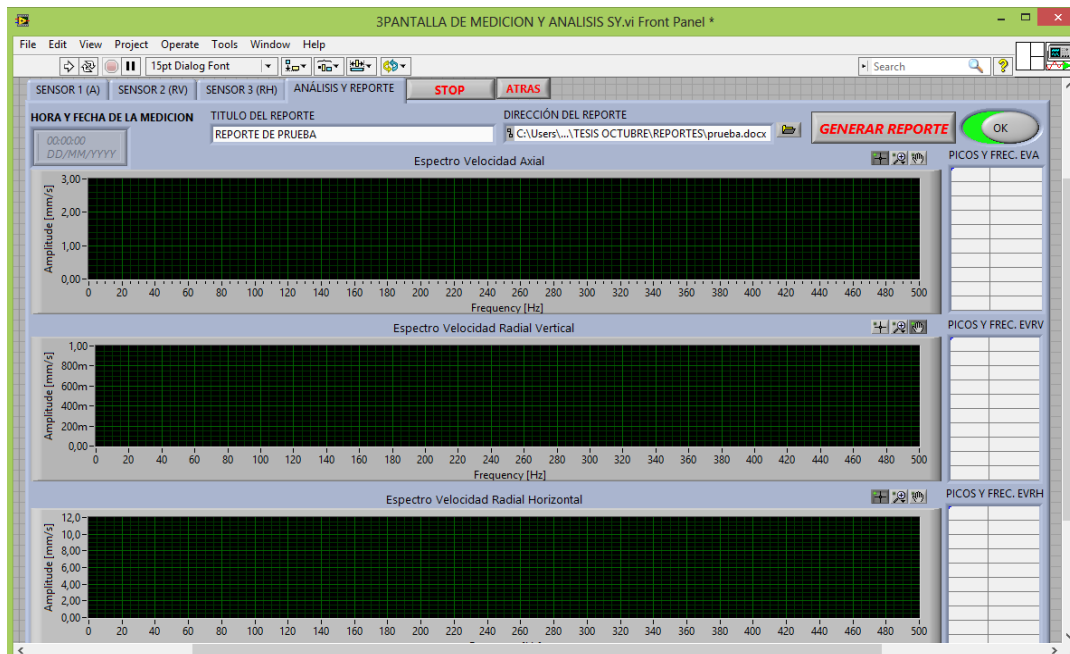
4.5.6 Dispose report VI. Cierra el informe y libera su interfaz ahorrando memoria. Después de ejecutar el VI, no se pueden realizar otras operaciones en el informe. Esta función debería ser la última VI que se utiliza al crear un informe.

Bloque dispose report VI



Todos estos circuitos son el diagrama de bloques de la pantalla “ADQUISICIÓN, ANÁLISIS Y REPORTE” y se muestra conectado en conjunto en el anexo G, la gran mayoría de los indicadores son insertados en la pestaña de análisis y reporte de mencionada pantalla como podemos apreciar a continuación en la figura 69.

Figura 69. Pestaña de análisis y reporte del panel frontal de la pantalla adquisición, análisis y reporte.

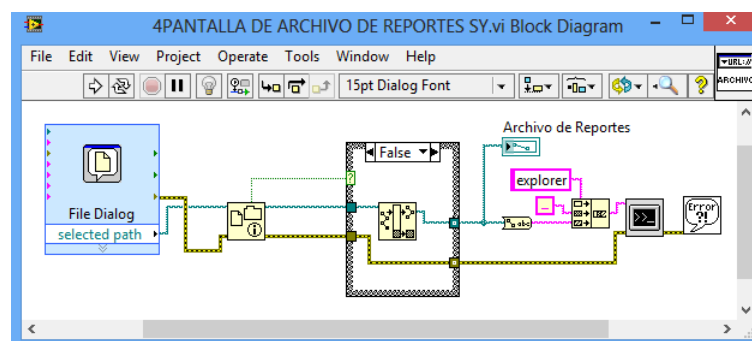


Fuente: Autores.

4.6 Diseño de del circuito para abrir el archivo de reportes.

Se creó un circuito sencillo pero de gran ayuda al momento de analizar es estado del activo pues nos permite trasladarnos rápidamente a la carpeta donde se encuentran los antiguos reportes realizado en el activo.

Figura 70. Diagrama de bloques para abrir el archivo de reportes.

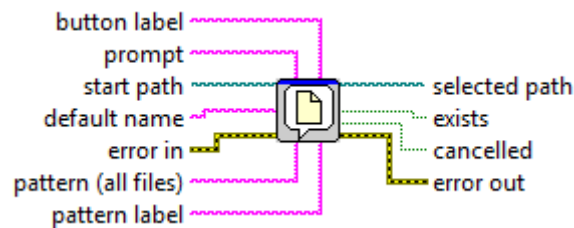


Fuente: Autores.

Los bloques utilizados en el diseño se detallan a continuación.

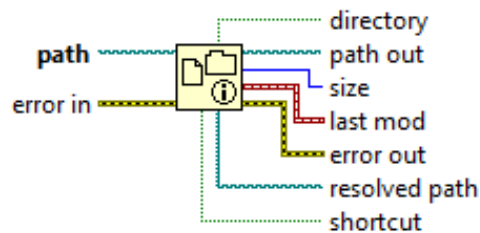
4.6.1 File dialog. Muestra un cuadro de diálogo con el que se puede especificar la ruta de acceso a un archivo o directorio. Puede utilizar este cuadro de diálogo para seleccionar archivos o directorios existentes o para seleccionar una ubicación y un nombre para un nuevo archivo o directorio.

Bloque file dialog



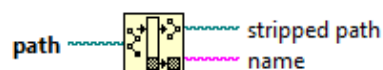
4.6.2 File/directory info. Devuelve información sobre el archivo o directorio especificado por path, incluyendo su tamaño, su última fecha de modificación, si se trata de un directorio, si se trata de un acceso directo, y la ruta de acceso resuelta si el archivo o directorio es un atajo.

Bloque file/directory Info



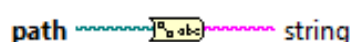
4.6.3 Strip path. Devuelve el nombre del último componente de una ruta de acceso y el camino despojado que conduce a ese componente.

Bloque strip path



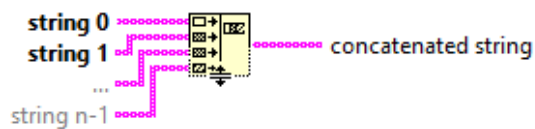
4.6.4 Path to string. Convierte camino hacia una cadena que describe la trayectoria en el formato estándar de la plataforma.

Bloque path to string



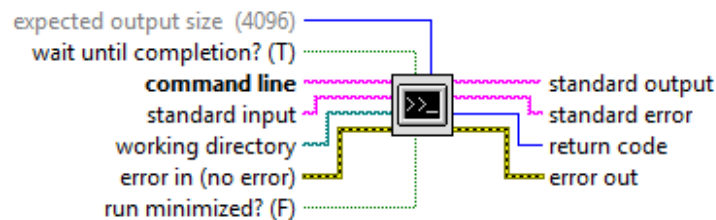
4.6.5 Concatenate strings. Enlaza cadenas de entrada y matrices 1D en una cadena de salida única. Para las entradas de la matriz, esta función conecta cada elemento de la matriz.

Bloque concatenate strings



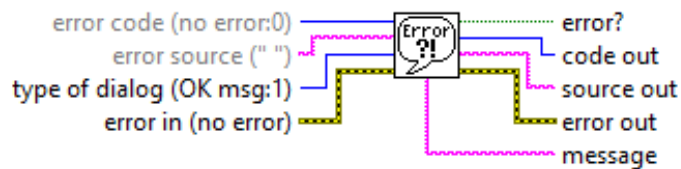
4.6.6 *Sistem exec VI.* Ejecuta un comando del sistema. Utilice el VI system exec para ejecutar o poner en marcha otras aplicaciones basadas en windows o aplicaciones de línea de comandos de Linux dentro de VIs. Con el exec system VI, se ejecuta una línea de comandos a nivel de sistema que puede incluir parámetros que admite la aplicación que desea iniciar.

Bloque del VI sistem exec



4.6.7 *Simple error handler VI.* Indica si se ha producido un error. Si se produce un error, el VI devuelve una descripción del error y muestra opcionalmente una caja de diálogo.

Bloque del VI simple error handler



CAPÍTULO V

5. INSTALACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

En este apartado se expone todas las actividades concernientes a la instalación, acople, pruebas preoperacionales, puesta a punto y la utilización misma de nuestro sistema para diagnosticar las fuentes de vibración en los bancos de prueba del laboratorio de Análisis Vibracional y Alineamiento Láser de la escuela de Ingeniería de Mantenimiento de la facultad de Mecánica de la ESPOCH.

El detalle de todas las actividades realizadas se encuentran a continuación.

5.1 Instalación y acople de las diferentes herramientas que componen el sistema.

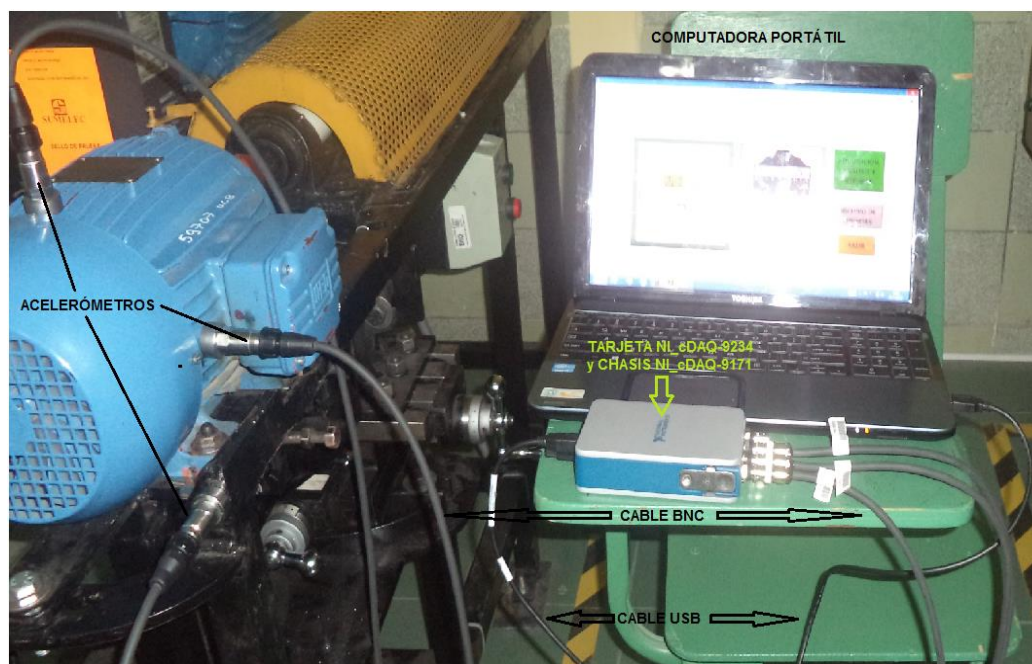
En este punto procedemos a acoplar los equipos siguiendo las indicaciones y recomendaciones expuestas por los fabricantes plasmadas en el disco magnético adjunto a los equipos y a precauciones propias del manejo de dispositivos en ambientes industriales.

Lo acotado anteriormente se aplica en los siguientes pasos.

1. Instalamos el software de desarrollo de aplicaciones y NI-DAQmx en el computador.
2. Conectamos el chasis NI_cDAQ-9171 a un puerto USB del ordenador mediante el cable correspondiente.
3. Realizamos la conexión a tierra del chasis.
4. Insertamos la tarjeta NI_cDAQ-9234 en el chasis como se indica en la documentación del módulo.
5. Llevamos a su primera medición en MAX. Damos clic en el módulo y seleccionamos paneles de prueba. Hacemos clic en Inicio y verificamos la funcionalidad de medición.
6. Una vez comprobado la funcionalidad de la tarjeta procedemos a conectar los acelerómetros IMI 603C01 mediante los cables BNC a la tarjeta.
7. Finalmente fijamos los acelerómetros a los puntos correspondientes.

De esta manera el sistema queda listo para la toma de datos en los bancos de pruebas del laboratorio antes mencionado como se muestra en la siguiente figura.

Figura 71. Conexión de los componentes del sistema



Fuente: Autores.

5.2 Pruebas preoperacionales y finales

Como en todo sistema este paso es imprescindible, ya que nos ayuda a ir puliendo de a poco, corrigiendo errores, configuraciones de los equipos y demás para luego llegar al objetivo final que será un producto (sistema en nuestro caso) terminado de calidad.

Las pruebas preoperacionales realizadas fueron varias, más que todo en la adquisición de datos, puesto que es la parte más importante del sistema. Otro de los temas álgidos también lo ha representado la fijación de los sensores al equipo, puesto que existen muchos métodos y el recomendado por los fabricantes no es el más factible en este caso precisamente como se aclaró en el apartado 3.1.2.2.

Con pruebas finales nos referimos a la puesta a punto de nuestro sistema lo que implica la modificación de detalles como: que las unidades de medida, la transformación de la señal, la presentación de valores en los indicadores numéricos, de texto y gráficos sean los correctos y que contribuyan a la emisión del diagnóstico.

5.3 Determinación de problemas característicos en equipos industriales

Este apartado corresponde a la utilización misma de nuestro sistema aplicando en este caso a cuatro equipos del laboratorio mencionado al inicio de este capítulo.

Para la determinación de los problemas procedemos de la siguiente manera.

5.3.1 Identificación de equipos. Los equipos utilizados para nuestro proyectos son en este orden motor acople reacondicionado, motor banda-eje, y motor acople y Motor ventilador por su accesibilidad para la colocación de los sensores. De estos motores obtenemos sus parámetros de funcionamiento y sus datos característicos como se muestran a continuación los cuales serán ingresados en las hojas de reportes.

Figura 72. Motor acople reacondicionado.



Fuente: Autores.

Tabla 9. Parámetros de funcionamiento motor acople reacondicionado.

Potencia	5HP	Voltaje	(220/380/440) V
Intensidad	(14 / 8.11 / 7) A	Rpm	1715
$\cos\phi$	0.81	Hz	60
Rendimiento	85.5%		

Fuente: Autores.

Tabla 10. Datos característicos motor acople reacondicionado

Marca: WEG		Número serie: 0280.1361	
Modelo: Jaula de ardilla		Año de fabricación: 2006	
Fecha de adquisición:2007		Fabricante: WEG	
Rpm: 1715	Potencia: 5HP		Voltaje:(220/380/440) V
Hz: 60	Intensidad: (14/8.11 /7) A		Número de fases: 3~
Tipo de corriente del Motor : Corriente alterna			

Fuente: Autores.

Figura 73. Motor banda – eje.



Fuente: Autores.

Tabla 11. Parámetros de funcionamiento motor banda – eje.

Potencia	1HP	Voltaje	(110/220) V
Intensidad	(14.2/7.1)A	Rpm	3520
$\cos\varphi$	0.75	Hz	60
Rendimiento	70%		

Fuente: Autores.

Tabla 12. Datos característicos motor banda – eje.

Marca: WEG		Número serie: D56	
Modelo: XXXXX		Año de fabricación: 2000	
Fecha de adquisición:2003		Fabricante: WEG	
Rpm: 3520	Potencia: 1 HP		Voltaje: (110/220) V
Hz: 60	Intensidad: (14.2/7.1) A		Número de fases:1~
Tipo de Motor: Corriente alterna			

Fuente: Autores.

Figura 74. Motor acople (WEG).



Fuente: Autores.

Tabla 13. Parámetros de funcionamiento motor acople.

Potencia	¼ HP	Voltaje	(110/220) V
Intensidad	(5.4/2.7)A	Rpm	1745
Cosφ	0.75	Hz	60
Rendimiento	70%		

Fuente: Autores.

Tabla 14. Datos característicos motor acople.

MOTOR		
Marca: WEG		Número serie: B48
Modelo: XXXXX		Año de fabricación: 2005
Fecha de adquisición:2007		Fabricante: WEG
Rpm: 1745	Potencia: ¼ HP	Voltaje: (110/220) V
Hz: 60	Intensidad: (5.4/2.7) A	Número de fases: 1~
Tipo de Motor: Corriente alterna		

Fuente: Autores.

Figura 75. Motor ventilador.



Fuente: Autores.

Tabla 15. Parámetros de funcionamiento motor ventilador.

Potencia	¼ HP	Voltaje	(110/220) V
Intensidad	(5.4/2.7)A	Rpm	1745
Cosφ	0.75	Hz	60
Rendimiento	70%		

Fuente: Autores.

Tabla 16. Datos característicos motor ventilador.

MOTOR		
Marca: WEG		Número serie: B48
Modelo: XXXXX		Año de fabricación: 2005
Fecha de adquisición: 2007		Fabricante: WEG
Rpm: 1745	Potencia: ¼ HP	Voltaje: (110/220) V
Hz: 60	Intensidad: (5.4/2.7) A	Número de fases: 1~
Tipo de Motor: Corriente alterna		

Fuente: Autores.

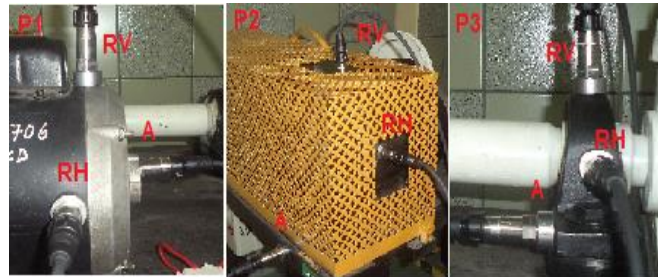
5.3.2 Obtención de datos. Para la obtención de datos identificamos los puntos clave de generación de vibraciones y se procede a colocar los sensores tomando en cuenta las recomendaciones de ubicación y orientación que se explicó en los apartados 3.1.2.1 y 3.1.2.3 respectivamente, como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 76. Puntos, ubicación y orientación de los sensores en el motor bomba.



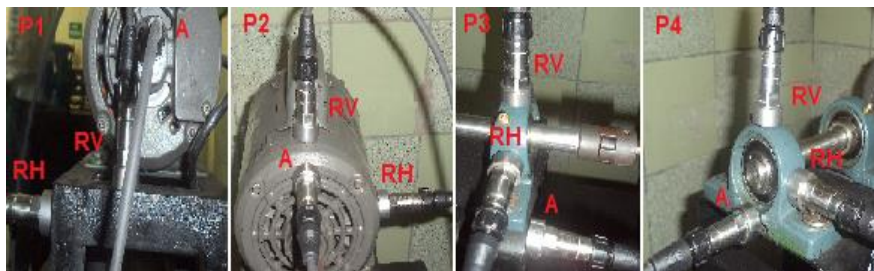
Fuente: Autores

Figura 77. Puntos, ubicación y orientación de los sensores en el motor banda - eje



Fuente: Autores

Figura 78. Puntos, ubicación y orientación de los sensores en el motor acople



Fuente: Autores

Figura 79. Puntos, ubicación y orientación de los sensores en el motor ventilador

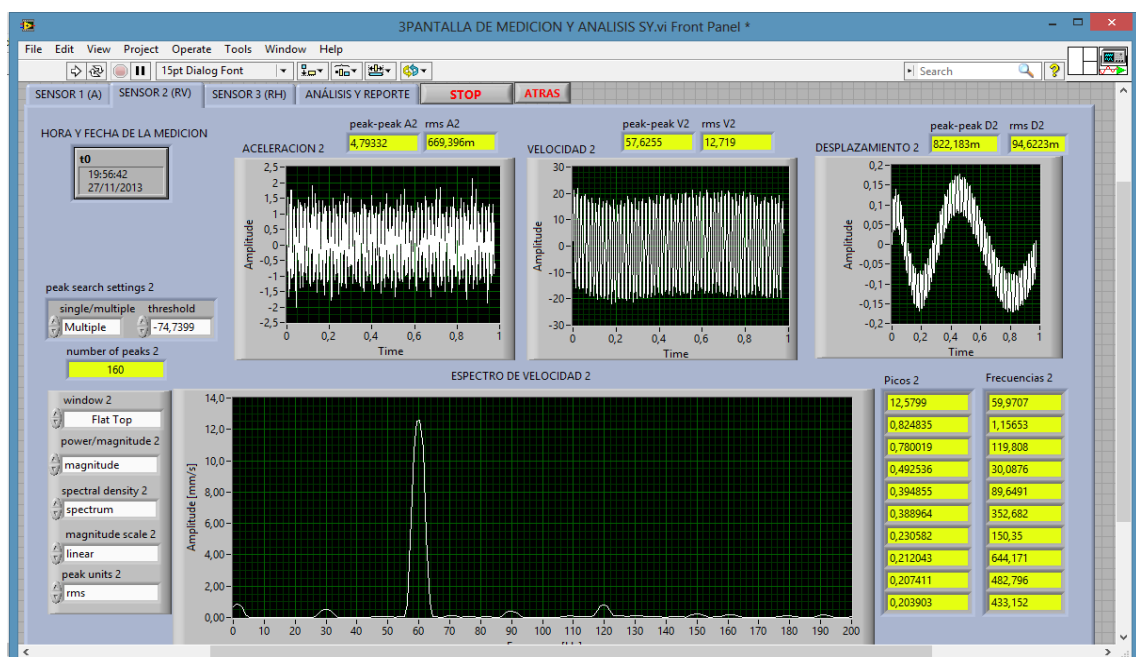


Fuente: Autores

Como se puede apreciar en las figuras anteriores en cada punto se ubican tres sensores en dirección axial (A), radial vertical (RV) y radial horizontal (RH) respectivamente, cada sensor adquiere una señal de vibración diferente, estas señales son convertidas a eléctricas a través del sensor para poder analizar y almacenar, con mayor detalle las funciones del sensor se redactó en el apartado 3.1.1.3

La adquisición de datos de cada punto genera una señal de aceleración, esta señal es integrada para ver los datos en unidades de velocidad. Cuando se integra de aceleración a velocidad, el sistema tiene en cuenta el desfase. La señal es adquirida en cada dirección que está fijado el sensor, por medio de nuestro sistema cada una es convertida a un espectro de velocidad de vibración acompañado de una tabla con el valor de la amplitud de los diez picos mayores y sus frecuencias correspondientes como se muestra en las tres primeras pestañas de la pantalla de adquisición, presentación y reporte del sistema (ver figura 80).

Figura 80. Sentido radial vertical del punto 2 del motor acople reacondicionado

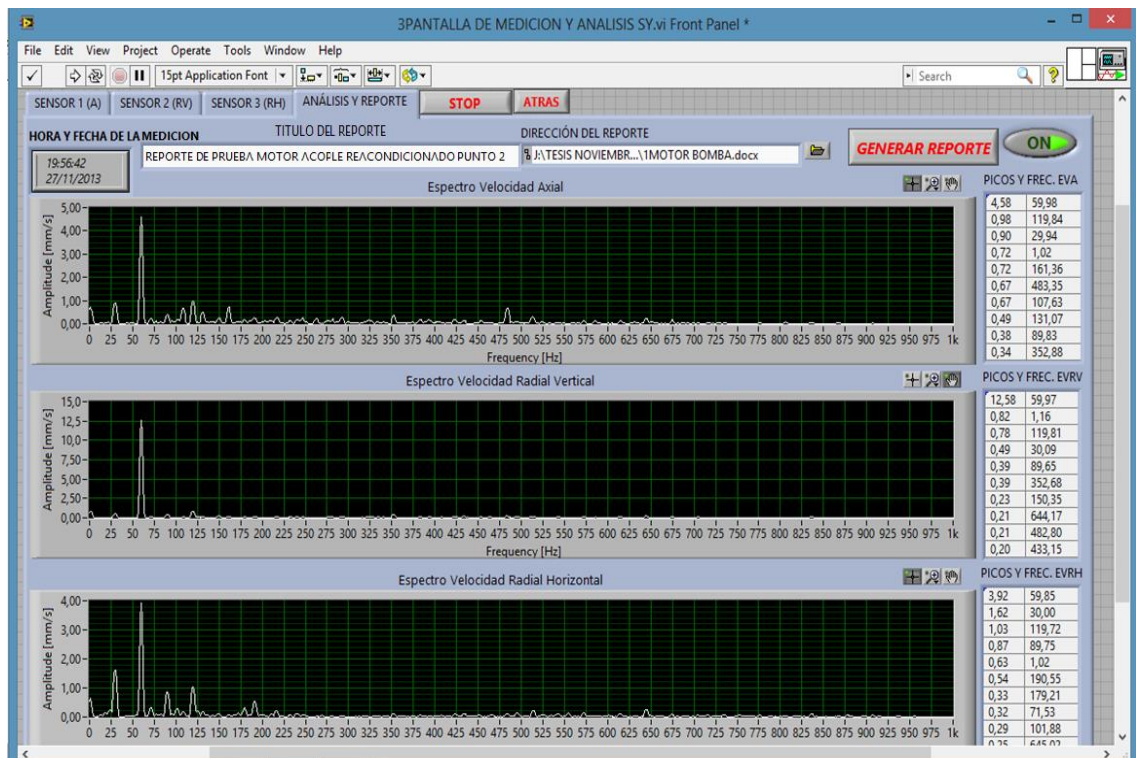


Fuente: Autores

Adicional a esto se encuentran tres graficas de forma de ondas, éstas son de aceleración, velocidad y desplazamiento con sus valores respectivos de rms y pico-pico más un indicador del número de picos generado como se puede apreciar en la figura 80, las gráficas muestran la variación tanto en fase como en amplitud de la señal obtenida y después de ser integrada con el bloque Vibration Level como se explica en el apartado 2.3, a la vez que nos sirve de ayuda para diagnosticar ciertos problemas como golpeteos, fallas de engranajes, fallas de rodamientos, etc.

5.3.3 Interpretación, conclusiones y recomendaciones. Para realizar la interpretación, conclusiones y recomendaciones el espectro de velocidad obtenido en cada dirección trasladado a la pestaña **Análisis y Reporte** de la Pantalla Adquisición, Presentación y Reporte del sistema junto con su tabla y la hora y fecha de la medición, además existe la posibilidad de ingresar el título del reporte de cada punto y la dirección donde se guardara el mismo. Antes de presionar el botón **“GENERAR REPORTE”** existe la posibilidad de aprobar o suspender la generación del reporte gracias al botón **“OK/CANCEL”** (ver figura 81).

Figura 81. Pestaña de análisis y reporte del punto 2 del motor acople reacondicionado



Fuente: Autores

Luego de escoger la dirección en la que se quiere que se guarde el reporte en el File Path (ruta de archivos) y verificar que los datos obtenidos son correctos ubicamos el botón **“OK/CANCEL”** en la posición ok y presionamos el botón **“GENERAR REPORTE”** para de esta manera generar las hojas en Word, este procedimiento es repetitivo para todos los puntos del equipo.

El reporte creado muestra la información del equipo su nombre, las tablas de características técnicas, la hora y fecha de la medición, los espectros y tablas. A esto se suma el espacio para emitir las conclusiones y recomendaciones.

Como pudimos apreciar los problemas detectables mediante la técnica de análisis vibracional y contemplando la posibilidad que exista la combinación de ellos son muchos más de los

mencionados en el apartado 2.5, una recopilación de ellos se muestra en las tablas del anexo H, este nos ayudara a exponer un correcto diagnóstico para cada punto de medición, para finalmente emitir conclusiones y recomendaciones generales del equipo, todo esto siguiendo los pasos que se detallan a continuación.

Pasos para emitir un correcto diagnóstico:

1. Categorizamos el equipo de acuerdo al dato de potencia en kW ($1\text{HP} = 0.746\text{ kW}$) de sus tablas de características, la norma ISO 10816-3 y parte de la norma ISO 2372 dado a que la primera no contempla el grupo de equipos con potencias menores a 5 kW.
2. Observo los armónicos del espectro para ubicar en que zona de severidad se encuentra con la ayuda de la tabla Tabla 3. Rangos de velocidad vibratoria para diferentes clases de máquinas con velocidad de rotación sobre 600 cpm. ISO 10816-3 de la norma ISO 10816-3, con esto verificamos si la amplitud del espectro supera o no los niveles de alarma.
3. Identificamos la fuente del problema mediante la obtención de las frecuencias fundamentales del espectro adquirido, ya sea del motor, transmisiones o rodamientos la cual coincide con la velocidad de giro en rps o cpm en el caso del motor y la ayuda de las fórmulas para los demás problema como se observa en el apartado 2.2.3 y las tablas del anexo H.

Una vez conocida la frecuencia fundamental observamos la amplitud y la frecuencia en que se presentan los armónicos con los datos que aparecen en la tabla adjunta, con la ayuda de las tablas del anexo H procedemos a emitir sus respectivas conclusiones y recomendaciones de cada punto y las finales del equipo. Este procedimiento es reiterativo para todos los equipos y las hojas de reporte son similares, a continuación sólo haremos referencia todo lo que se hizo con el primer motor escogido.

5.3.4 Hojas de reportes. Antes de mostrar las hojas de reportes de los equipos explicaremos los pasos realizados (cálculos y verificaciones) para el motor acople antes de emitir las conclusiones y recomendaciones.

Con los pasos para la emisión de diagnósticos mencionados en el apartado anterior se tiene:

1. El motor acople reacondicionado al tener una potencia de 5 hp o su equivalente 3.73 kW pertenece al grupo 5.
2. Como las máquinas que de acuerdo a la amplitud de sus armónicos se ubiquen en las zonas A, B y C en la práctica pueden seguir operando, sólo tomamos en cuenta los

armónicos cuya amplitud supere el valor de 4,5 mm/s, es decir aquellos que lo ubiquen al equipo en la zona D de la tabla.

Entonces en este punto se puede observar claramente que:

- En el espectro de velocidad axial se presentan dos picos elevados, el mayor con un valor de 2.20 a la frecuencia de 644 Hz y el siguiente con una amplitud de 1,8 y frecuencia de 59,70, lo cual lo ubican a la máquina en la zona C.
- En el espectro de velocidad radial vertical se presentan dos picos muy elevados, el mayor con un valor de 15.8 a la frecuencia de 59,75 Hz y el siguiente con una amplitud de 6,0 y frecuencia de 1,02, lo cual lo ubican a la máquina en la zona D
- En el espectro de velocidad radial horizontal se presentan tres picos elevados, el mayor con un valor de 6.94 a la frecuencia de 1,02 Hz, el siguiente con una amplitud de 5,58 y frecuencia de 59,69 Hz, y finalmente uno de amplitud 3,95 a la frecuencia de 29,97; los dos primeros lo ubican al equipo en la zona D, mientras que el último lo ubica al mismo en la zona C.

3. La frecuencia fundamental de nuestro motor es $1715 \text{ rpm} / 60 = 28,58 \text{ Hz} = 1X$

Con toda esta información obtenida al final de la hoja de reportes podemos emitir las conclusiones y recomendaciones finales del equipo completo.

Las hojas de reportes creadas como ya dijimos son similares a continuación se detalla el reporte completo del motor acople y de los demás equipos en el anexo I las cuales podemos modificar para mejorar su presentación.

MOTOR ACOPLA REACONDICIONADO



Parámetros de funcionamiento motor acople reacondicionado (de la tabla 9)

Potencia	5HP	Voltaje	(220/380/440) V
Intensidad	(14 / 8.11 / 7) A	Rpm	1715
Cosφ	0.81	Hz	60
Rendimiento	85.5%		

Datos característicos motor acople reacondicionado (de la tabla 10)

Marca: WEG	Número serie: 0280.1361	
Modelo: Jaula de ardilla	Año de fabricación: 2006	
Fecha de adquisición: 2007	Fabricante: WEG	
Rpm: 1715	Potencia: 5HP	Voltaje: (220/380/440) V
Hz: 60	Intensidad: (14/8.11 /7) A	Número de fases: 3~
Tipo de corriente del Motor : Corriente alterna		

$$1715 \text{ rpm a rps} = 28.58 \approx 30 = 1X$$

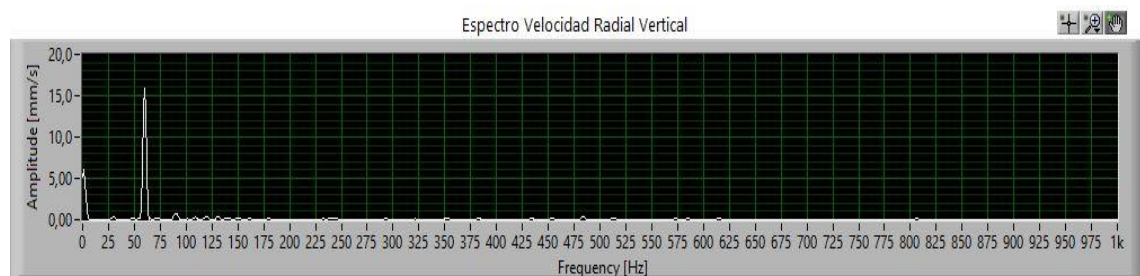
REPORTE DE PRUEBA MOTOR ACOPLE REACONDICIONADO PUNTO 1

HORA Y FECHA DE LA MEDICION

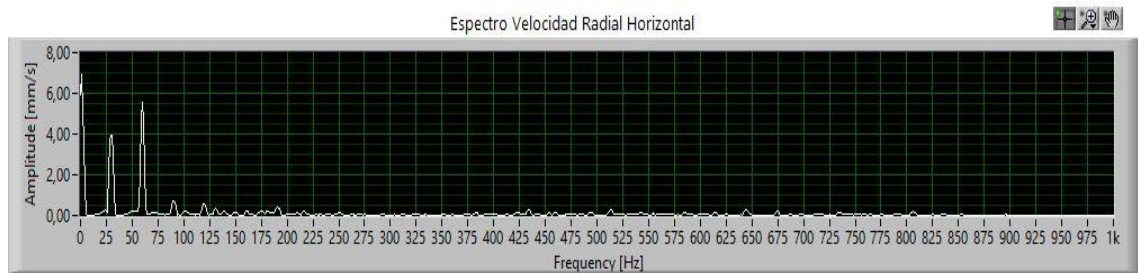
19:55:58
27/11/2013



2,20	644,34
1,78	59,70
1,40	29,98
1,11	1,02
1,08	513,23
0,93	674,09
0,79	483,33
0,70	434,06
0,68	614,40
0,64	161,07



15,81	59,75
6,03	1,02
0,77	89,88
0,37	119,82
0,33	131,07
0,31	483,33
0,29	108,54
0,27	30,10
0,23	150,40
0,22	72,07



6,94	1,02
5,58	59,69
3,95	29,97
0,73	90,05
0,56	119,43
0,40	190,51
0,32	131,07
0,27	513,02
0,26	644,34
0,26	434,12

ANÁLISIS:

- En la dirección axial no tenemos armónicos que pasen los 4,5 mm/s.
- En la dirección radial vertical se puede apreciar ya un problema severo de desalineamiento paralelo por la presencia del armónico $2X = 15,81$.
- En la dirección radial también tenemos un problema de desalineamiento paralelo por la presencia del armónico $2X = 5.58$

REPORTE DE PRUEBA MOTOR ACOPLE REACONDICIONADO PUNTO 2

HORA Y FECHA DE LA MEDICION

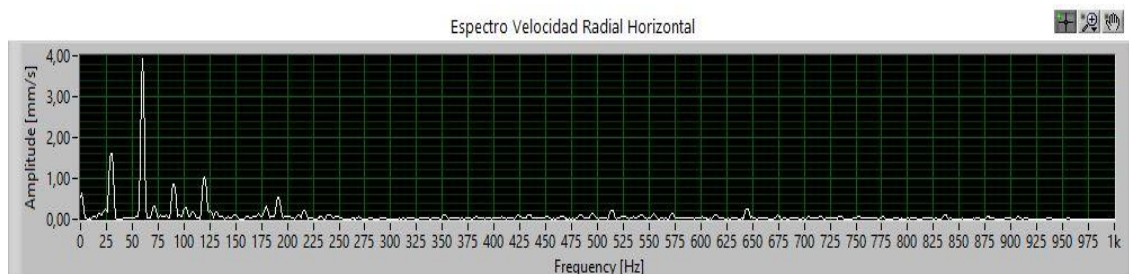
19:56:42
27/11/2013



4,58	59,98
0,98	119,84
0,90	29,94
0,72	1,02
0,72	161,36
0,67	483,35
0,67	107,63
0,49	131,07
0,38	89,83
0,34	352,88



12,58	59,97
0,82	1,16
0,78	119,81
0,49	30,09
0,39	89,65
0,39	352,68
0,23	150,35
0,21	644,17
0,21	482,80
0,20	433,15



3,92	59,85
1,62	30,00
1,03	119,72
0,87	89,75
0,63	1,02
0,54	190,55
0,33	179,21
0,32	71,53
0,29	101,88
0,25	645,02

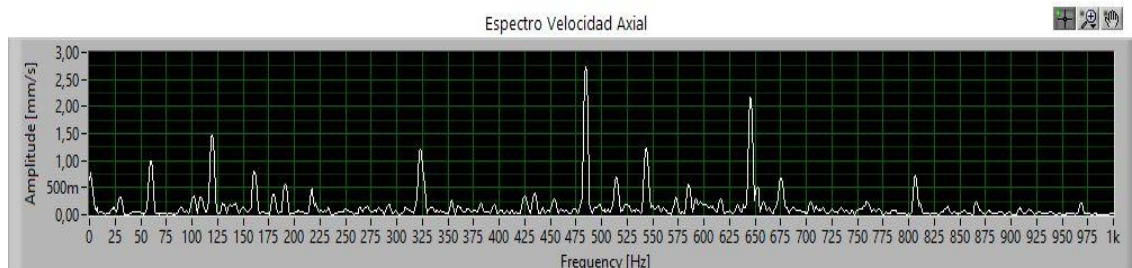
ANÁLISIS:

- En la dirección axial existe el armónico $2X = 4,58$ que denota un problema de desalineamiento angular.
- En la dirección radial la presencia del armónico $2X = 12,58$ muestra un problema de desalineamiento paralelo.
- En la dirección radial horizontal no existen armónicos superiores a 4,5 mm/s

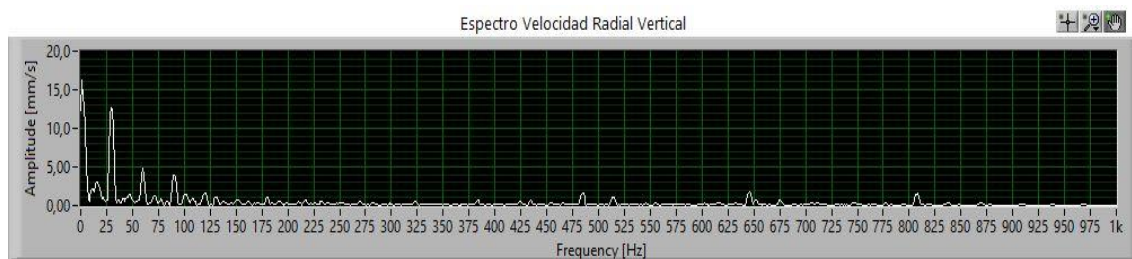
REPORTE DE PRUEBA MOTOR ACOPLE REACONDICIONADO PUNTO 3

HORA Y FECHA DE LA MEDICION

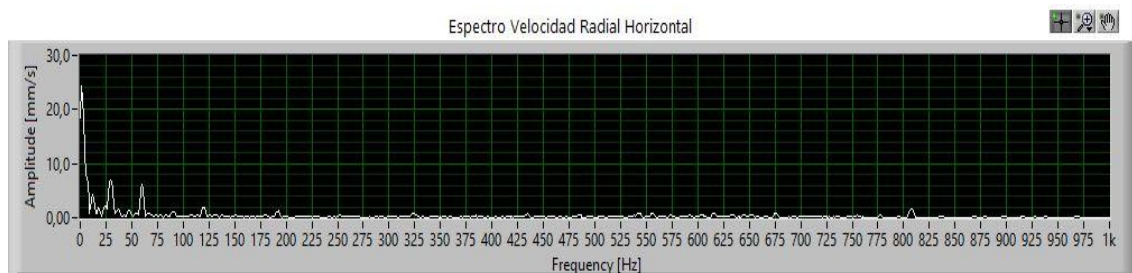
20:02:27
27/11/2013



2,73	484,47
2,16	645,38
1,47	119,80
1,22	543,66
1,21	323,35
0,99	60,09
0,79	160,92
0,78	1,02
0,73	806,91
0,70	514,05



16,28	1,02
12,64	29,96
4,75	59,48
3,95	89,94
3,04	16,21
2,22	12,20
1,72	646,14
1,59	119,90
1,58	484,94
1,55	807,88



24,46	1,02
6,85	29,82
6,12	59,62
4,27	12,29
2,19	23,55
1,94	119,81
1,86	17,41
1,60	36,86
1,57	807,94
1,34	48,13

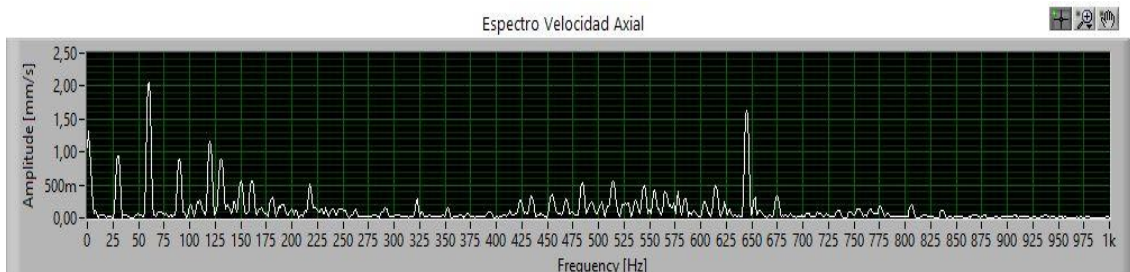
ANÁLISIS:

- En la dirección axial no existe armónicos superiores a 4,5 mm/s.
- En la dirección radial vertical los armónicos $1X = 12,64$ y $2X = 4,75$ denotan un problema de desalineamiento paralelo.
- En la dirección radial horizontal los armónicos $1X = 6,85$ y $2X = 6,12$ denotan un problema de desalineamiento paralelo.

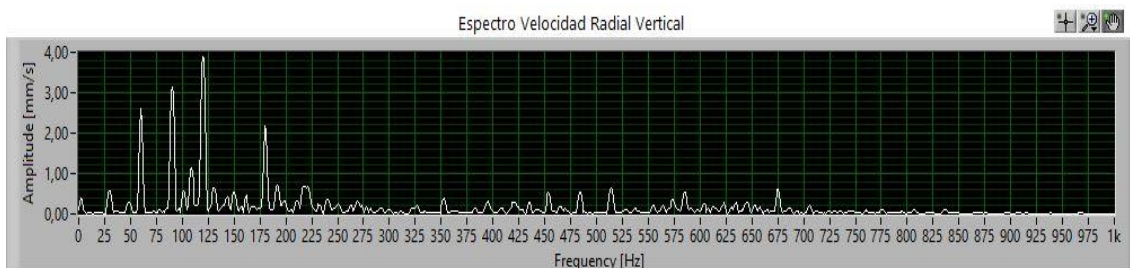
REPORTE DE PRUEBA MOTOR ACOPLE REACONDICIONADO PUNTO 4

HORA Y FECHA DE LA MEDICION

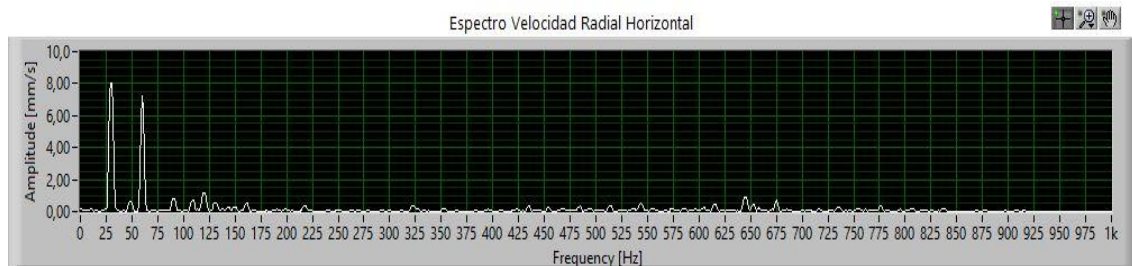
20:06:48
27/11/2013



2,05	60,17
1,62	645,12
1,31	1,02
1,16	119,81
0,94	29,98
0,90	131,11
0,90	90,00
0,56	161,32
0,56	514,21
0,55	150,32



3,89	120,01
3,13	90,07
2,60	60,08
2,18	180,18
1,14	108,54
0,73	191,49
0,69	217,12
0,66	220,86
0,63	130,36
0,63	514,09



8,07	30,06
7,21	60,17
1,20	120,04
0,93	645,12
0,83	90,11
0,69	108,68
0,69	675,77
0,66	49,06
0,56	131,07
0,55	161,40

ANÁLISIS:

- En la dirección axial y radial vertical no hay armónicos sobre los 4,5 mm/s.
- El espectro en la dirección radial horizontal los armónicos 1X = 8.07 y 2X = 7,21 denotan un problema de desalineamiento paralelo.

CONCLUSIONES FINALES DEL EQUIPO

Luego del análisis presentado anteriormente ya podemos emitir las conclusiones y recomendaciones finales del activo, entonces el problema de equipo es un desalineamiento combinado.

RECOMENDACIONES FINALES DEL EQUIPO

- Revisar el ajuste entre el eje y el rodamiento.
- Revisión de acoples.
- Realizar la alineación del equipo.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

Realizamos un estudio minucioso de los sistemas de detección de problemas en equipos industriales para identificar sus fortalezas y falencias en el manejo, con esto desarrollamos un sistema alternativo para el diagnóstico de problemas en estos equipos.

Identificamos que los alcances del sistema son la visualización de ondas de la señal obtenida por cada acelerómetro y después de ser integrada, obtención de los datos exactos de los diez picos mayores en el espectro de velocidad con sus respectivas frecuencias, se puede modificar las propiedades del Power Spectrum desde una de las pantallas de navegación, etc. y que su limitación es que el sistema por sí solo no deduce que problema ocurre en el equipo, mas nos da la información adecuada para que el usuario utilice sus conocimientos de ingeniería y pueda determinar con facilidad el problema.

Se diseñó y construyó las plataformas para la adquisición, análisis y presentación de datos en LabVIEW y verificamos el buen funcionamiento de los mismos mediante la realización pruebas en el laboratorio de Análisis Vibracional y Alineamiento Láser de la ESPOCH.

Se realizó las mediciones con la debida explicación desde la colocación de los sensores hasta la determinación de los problemas más comunes en equipos industriales mediante análisis vibracional a través del software LabVIEW, lo que servirá como una guía de prácticas para el usuario del sistema.

6.2 Recomendaciones

Leer completamente el manual de utilización del sistema antes de utilizarlo.

Intalar el sistema en una computadora portátil de características mínimas como de memoria instalada RAM igual a 4 GB, sistema operativo de 64 bits y un procesador Intel(R) core(TM) i5 para el manejo rápido de los equipos, velocidad del sistema.

Ubicar los sensores en el mismo orden con el que están conectados a la tarjeta de adquisición de datos, es decir, sensor uno en el sentido axial, sensor dos en el sentido radial vertical y sensor tres en el sentido radial horizontal.

Tener en cuenta la hoja de especificaciones de los sensores para ingresar el dato de sensibilidad correcto cuando se esté configurando el bloque DAQ Assistant debido a que su sensibilidad de medida es distinta.

Poseer conocimientos en el manejo de las normas de severidad de vibraciones y el uso de las tablas de los espectros característicos de los problemas propios de los equipos industriales para interpretar el resultado de la medición con facilidad y emitir un correcto diagnóstico.

Realizar las investigaciones adecuadas para adicionar otras técnicas de análisis vibracional tales como: análisis de orbitas, análisis de orden, análisis de octavas, etc., que permitan potenciar nuestra sistema.

Efectuar las investigaciones correspondientes sobre la programación para pruebas de balanceo y calidad energética en equipos industriales y añadir al sistema, debido a que la tarjeta de adquisición cuenta con cuatro entradas que facilita esta clase de aplicación.

Ejecutar la adquisición de datos utilizando el método invasivo (con perno) para la fijación de los sensores y comparar con los resultados obtenidos con el método no invasivo (bases magnéticas).

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA AVECILLAS, Douglas Steven y MOLINA JIMÉNEZ, Johannex Kingsiño. 2011. *Adquisición de Vibraciones Mecánicas de un Motor en funcionamiento usando LabVIEW*. Guayaquil : s.n., 2011.

A-MAQ S.A., Análisis de Maquinaria. 2005. *Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico*. Medellín : s.n., 2005.

CALLE, Walter. 2009. *Diagnóstico del Estado de Motores Trifásicos de Inducción a través del Análisis de Vibración y Consumo de Corriente con la Utilización del Software LabVIEW*. Cuenca : s.n., 2009.

CAMPOS, Adoración. 2008. tecnologia-alarcos.wikispaces.com. [En línea] 17 de 06 de 2008. [Citado el: 20 de 12 de 2012.]
<http://tecnologia-alarcos.wikispaces.com/file/view/Tema+definitivo+de+m%C3%A1quinas.pdf>.

CUEVAS, Alejandro. 2008. *Sistema para el Diagnóstico Incipiente de Falla en un Motor de Inducción*. México D.F. : s.n., 2008.

DAZA, Gonzalo. 2007. *Apuntes del Curso Vibraciones Mecánicas*. Concepcion Chile : s.n., 2007.

MARTÍN, Javier. 2006. redewev. [En línea] 06 de 2006.
http://www.redewev.com/_txt/619/78.pdf.

MONJE CENTENO, Daniel. 2010. *Conceptos Electrónicos en la Medida de la Aceleración y la Vibración*. Sevilla : s.n., 2010.

MOROCHO, Manuel. 2003. *Análisis Vibracional y Alineamiento Láser*. Riobamba : Docucentro, 2003.

MOROCHO, Manuel. 2008. *Diagnóstico Vibroacústico*. Riobamba : s.n., 2008.

MOSQUERA, G y PIEDRA, M. *Las Vibraciones Mecánicas y su Aplicación al Mantenimiento Predictivo*.

National Instrument Corporation. 2012. *Introducción a LabVIEW*. USA : s.n., 2012.

National Instrument Corporation. 2012. *LabVIEW User Manual*. USA : s.n., 2012.

National Instrument Corporation. 2012. *Measurement and Automation Catalog*. USA : s.n., 2012.

National Instrument. 2012. www.ni.com. [En línea] 01 de 2012. [Citado el: 28 de 12 de 2012.]
<http://www.ni.com/labview/why/esa/>.

PALOMINO, Marín. 1997. *La Medición y el Análisis de Vibraciones en el Diagnóstico de Máquinas Rotatorias*. Cuba : s.n., 1997.

REINA, Otaysa. 2006. Curso de Análisis Vibracional I y II. Guayaquil : s.n., 2006.

Sinais. 2013. Sinais ingeniería. [En línea] 2013. [Citado el: 20 de Marzo de 2013.] http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/sensores_vibracion.html.

SOLIS, Edgar. 2005. *Diseño e Implementación de un Sistema de Diagnóstico de Fallas en Máquinas Rotatorias mediante Análisis Espectral de Vibraciones*. Latacunga : s.n., 2005.

Tecnología Sefarad. 2010. www.tecnosefarad.com. [En línea] 07 de Marzo de 2010. [Citado el: 20 de Diciembre de 2012.] http://www.tecnosefarad.com/wp-content/archivos/bach_1/mecanica/sistemas_mecanicos.pdf.

THOMSON, W T. 1983. *Teoría de Vibraciones: Aplicaciones, Pretice*. s.l. : Hall Hisp, 1983.

W, Glenn. 2003. *Vibraciones Mecánicas*. Alemania : DLI Engineering Coro, 2003.